CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Bartira Rodrigues Neves

ESTUDO DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM 100% DE CONCRETO ASFÁLTICO FRESADO PARA APLICAÇÃO A FRIO EM MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

Belo Horizonte
Novembro de 2018

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

MESTRADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Bartira Rodrigues Neves

ESTUDO DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM 100% DE CONCRETO ASFÁLTICO FRESADO PARA APLICAÇÃO A FRIO EM MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, linha de pesquisa Reciclagem, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais
Linha de Pesquisa: Reciclagem
Orientador: Dr. Flávio Renato de Góes Padula

Belo Horizonte
Novembro de 2018

Neves, Bartira Rodrigues.
N518e Estudo do desempenho de misturas asfálticas recicladas a quente com 100% de concreto asfáltico fresado para aplicação a frio em manutenção de pavimentos / Bartira Rodrigues Neves. - 2018.
138 f. : il., fotos, grafs., tabs.
Orientador: Flávio Renato de Góes Padula.

Dissertação (mestrado) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.
Bibliografia.

1. Pavimentos de asfalto – Manutenção e reparos. 2. Fresagem. 3. Concreto asfáltico. 4. Asfalto - Reciclagem. I. Padula, Flávio Renato de Góes. II.Título.

CDD: 620.196

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - Campus I / CEFET-MG
Bibliotecária: Deiler Fraga Rabelo - CRB/6-2318

ESTUDO DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM 100% DE CONCRETO ASFÁLTICO FRESADO PARA APLICAÇÃO A FRIO EM MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, linha de pesquisa Reciclagem, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

_____

Professor: Dr. Flávio Renato de Góes Padula - orientador

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

_____

Professora: Dra. Ivete Peixoto Pinheiro Silva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

_____

Professor: Dr. Cláudio José Martins

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Belo Horizonte, 19 de novembro de 2018.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus e ao Mestre dos Mestres Jesus, pois os maiores ensinamentos de minha vida tenho aprendido com Eles; à minha família, em especial à minha mãe e minha irmã Rosana; aos professores e professoras do curso de mestrado e ao meu orientador, professor Dr. Flávio Renato de Góes Padula.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me proporcionado essa oportunidade. À minha família por ter me apoiado e me sustentado com orações, sua ajuda foi fundamental.

Ao meu orientador, professor Dr. Flávio Renato de Góes Padula por ter me confiado o desenvolvimento dessa pesquisa e pela sua ajuda no entendimento dos conceitos e orientações.

Aos professores do CEFET-MG pela disponibilidade, paciência e carinho com que me trataram em especial aos professores Dr. Augusto Bezerra, Dr. Ezequiel Costa e a professora Dra. Ivete Peixoto, sempre nos enriquecendo com suas valiosas informações.

A FAPEMIG e a FINEP pelo suporte e apoio financeiro ao desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas de mestrado pelas contribuições e compartilhamento de informações e conhecimento.

Aos colegas de trabalho da DM Geologia e Engenharia Ltda, em especial ao geólogo Davi Meleu, por me liberar na parte da tarde para realizar a pesquisa.

Ao Sr. Tomás Arantes, responsável pela Regional Oeste da SUDECAP e ao Sr. Maurício Cangussú Magalhães (SUDECAP), não só pelas entrevistas concedidas, mas também pela disponibilidade em ajudar na pesquisa, com informações sobre os serviços de manutenção das vias de Belo Horizonte e por nos ceder o principal material da pesquisa: o CAF (Concreto Asfáltico Fresado).

À empresa LWART Lubrificantes por ceder o óleo automotivo reciclado e rerrefinado, utilizado nas misturas pesquisadas.

Ao Sr. Alexandre Reis, responsável pela usina de asfalto da empresa Etros Engenharia, por nos permitir visitar a usina e acompanhar a produção de asfalto.

A todos os funcionários do CEFET/MG, em especial ao pessoal do Departamento de Mestrado de Engenharia de Materiais (Caroline); as equipes dos laboratórios de Engenharia Civil e Engenharia de Materiais e laboratório de Pavimentação (Richard, professor Dr. Mateus Justino da Silva e o técnico de laboratório Sr. Adilson Ramos da Silva), pelo apoio durante a pesquisa experimental; ao Sr. José Carlos da equipe de manutenção.

“Porque o Senhor é quem concede a sabedoria; e da sua boca procedem o conhecimento e a inteligência”.

Provérbios 2:6

RESUMO

A reciclagem a quente do Concreto Asfáltico Fresado (CAF), como material de composição de misturas asfálticas, visa reforçar o conceito de sustentabilidade na área de pavimentação asfáltica, promovendo a mitigação de danos causados pelas extrações de petróleo e agregados naturais. O CAF é um resíduo produzido em abundância em obras de manutenção de pavimentação asfáltica, mas ainda é pouco utilizado em reciclagens a quente de misturas asfálticas. A pesquisa teve como objetivo principal o estudo do desempenho de misturas asfálticas recicladas a quente, com 100% de CAF, para aplicação a frio em operações de tapa-buracos. Na pesquisa experimental, antes de iniciar as dosagens dos materiais, realizou-se a caracterização física do resíduo. Os resultados dos ensaios de granulometria e extração de betume foram aprovados para o uso nas dosagens das misturas, por apresentarem as características estabelecidas pela curva de referência do DNIT (faixa "C"). A adição de *Re-refined Engine Oil Bottom* (REOB) nas misturas asfálticas recicladas a quente teve como função manter a trabalhabilidade da mistura em temperatura ambiente e proporcionar o rejuvenescimento das propriedades do ligante envelhecido presente no CAF. A caracterização mecânica foi feita por meio de corpos de prova, que foram moldados pela metodologia Marshall, para realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e estabilidade e fluência Marshall. As nove dosagens, desenvolvidas durante a pesquisa, foram divididas em três grupos: G1, G2 e G3. Os resultados das misturas dos grupos G2 e G3 apresentaram aumento da estabilidade em relação às misturas do grupo G1, que continham em suas dosagens 1% de cal. A interação entre os materiais das misturas foi aumentada com a inserção do pó de borracha, que também contribuiu para melhorar o desempenho físico-mecânico dos corpos de prova. O REOB, para além de restaurar as propriedades do betume oxidado do CAF, contribuiu para modificar de forma positiva a estabilidade e as propriedades volumétricas das misturas. Ao aumentar o teor de REOB para 20% nas dosagens das misturas de referência "G3MR", a estabilidade Marshall aumentou em 28% em relação à mistura "G2MR", que continha em sua dosagem 10% de REOB. De uma forma geral, a estabilidade das misturas aumentou com a inserção dos conteúdos de ligante virgem e REOB. Considerando-se os resultados dos ensaios e a viabilidade econômico-ambiental da

mistura “G3MR”, optou-se por realizar uma amostragem de ensaios de estabilidade e fluência Marshall com essa mistura, aumentando-se a energia de compactação dos corpos de prova de 75 golpes para 95 golpes. Os resultados destes ensaios apresentaram melhora nas propriedades volumétricas, como reduções do Volume de Vazios (VV) e os Vazios do Agregado Mineral (VAM); aumentou a Relação Betume Vazios e a estabilidade em 61%, o que proporcionou à mistura maior rigidez. Os resultados obtidos, neste trabalho, confirmaram a proposta da pesquisa, apresentando-se dosagens de misturas asfálticas recicladas a quente com 100% de CAF e adições de REOB, Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), pó de borracha e cal, com boa trabalhabilidade e resistência mecânica. As misturas desenvolvidas caracterizam-se como alternativa de material em operações de tapa-buracos, com aplicação a frio.

Palavras-chave: Reciclagem a quente; Concreto Asfáltico Fresado (CAF); REOB; Pó de borracha; Operações de tapa-buracos.

ABSTRACT

The hot recycling of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), as material to compose asphalt mixtures, aims to reinforce the sustainability concept of the asphalt paving area, promoting the mitigation of damages caused by oil and natural aggregates extraction. RAP is a residue, which is produced in abundance during the maintenance of asphalt paving, but it is still little used in hot asphalt recycling mixtures. The main objective of this research was to study the performance of hot recycled asphalt mixtures with 100% of RAP, for cold application in pothole. In the experimental research, before the materials dosages, the physical characterization of RAP was carried out. The results of granulometry and bitumen extraction tests carried out for the RAP were approved for use in the asphalt mixture dosages, since they presented the characteristics established by the reference curve of DNIT ("C" range). The addition of *Re-refined Engine Oil Bottom* (REOB) in the hot recycled asphalt mixtures had as function to maintain the workability of the mixture at ambient temperature and provide rejuvenation of the properties of the aged binder present in the RAP. The mechanical characterization was made with compressed samples, which were molded by the Marshall methodology, to perform the tests of diametral compression strain and Marshall stability and fluency. The nine dosages, developed during the research, were divided into three groups: G1, G2 and G3. The results of the mixtures of groups G2 and G3 showed increased in stability over the mixtures of group G1, which contained in their dosages 1% of lime. The interaction between the materials of the mixtures was increased with the insertion of the rubber powder, which also contributed to improve the physical-mechanical performance of the samples. The REOB, besides restoring the properties of the aged binder of the CAF, it also contributed to a positive modification of the stability and the volumetric properties of the mixtures. By increasing the REOB content up to 20% in the dosages of the reference mixtures "G3MR", Marshall stability increased by 28% over the "G2MR" mixture, which contained in its dosage 10% of REOB. Generally, the stability of the mixtures increased with the insertion of binder and REOB contents. Considering the results of the tests and the economic-environmental feasibility of the "G3MR" mixture, it was chosen to perform a Marshall stability and fluency test with this mixture, increasing the compaction energy of the samples from 75 blows to 95

blows. The results of these tests showed improvements in the volumetric properties, such as reductions in the Voids' Volume (VV) and the Voids of the Mineral Aggregate (VAM); increased the Empty Bitumen Ratio and stability by 61%, which gave the mixture greater rigidity. The results obtained in this work confirmed the research proposal, which were presenting dosages of hot recycled asphalt mixtures with 100% of RAP and addition of REOB, petroleum asphalt cement (bitumen), rubber powder and lime, with good workability and mechanical strength. The developed mixtures characterized as an alternative material in pothole maintenance, with cold application.

Keywords: Hot recycling; Reclaimed Asphalt Pavement (RAP); REOB; Rubber powder; Pothole maintenance.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 Objetivos da pesquisa 21
1.1.1 Objetivo geral 21
1.1.2 Objetivos Específicos 21
1.2 Justificativa 21
1.3 Desenvolvimento do tema 22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 23
2.1 Pavimentos asfálticos 23
2.2 Processo de fresagem de pavimentos 24
2.2.1 Fresagem fina e microfresagem 27
2.2.2 Geração de CAF em Belo Horizonte e região metropolitana 29
2.3 Gestão do CAF 30
2.3.1 Estocagem do resíduo 31
2.3.2 Envelhecimento do ligante asfáltico 32
2.4 Processo de reciclagem a quente de CAF 35
2.4.1 Caracterização do fresado 35
2.4.2 Microcaracterização do fresado 36
2.4.3 Usinas para reciclagem a quente de CAF 37
2.4.4 Viabilidade econômica-ambiental na produção de MARQ 40
2.5 Agentes de reciclagem 41
2.5.1 Re-refined Engine Oil Bottom (REOB) como agente de reciclagem 42
2.6 A Cal utilizada como aditivo 45
2.7 Pó de borracha como modificador de mistura asfáltica 46
2.8 Patologias de pavimentos asfálticos 48
2.8.1 Desgastes por fendilhamento 51
2.8.2 Desgastes por afundamentos 52
2.8.3 Desgastes por ondulações e escorregamentos 53
2.8.4 Efeitos da exsudação do CAP 53
2.8.5 Desgaste por perda de material 54
2.8.6 Formação de cavidades no pavimento 55
2.9 Manutenção e reabilitação de pavimentos flexíveis 57
2.9.1 Reparos na superfície do pavimento 59
2.9.2 Reparos com aplicação de mistura asfáltica fria 62

3 MATERIAIS E MÉTODOS 65
3.1 Materiais 66
3.1.1 Concreto Asfáltico Fresado (CAF) 67
3.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 68
3.1.3 Re-refined Engine Oil Bottom (REOB) 69
3.1.4 Cal hidratada 70
3.1.5 Pó de borracha 71
3.2 Métodos 72
3.2.1 Coleta e amostragem dos materiais 73
3.2.2 Ensaio de extração de betume das amostras de CAF 74
3.2.3 Ensaios de granulometria do fresado 77
3.2.4 Densidades real e aparente e absorção de água pelos agregados 79
3.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com detector (EDS) 80
3.2.6 Moldagem dos corpos de prova 83
3.2.7 Densidade máxima teórica (G_{mm}) 86
3.2.8 Propriedades volumétricas das misturas asfálticas compactadas 88
3.2.9 Ensaios mecânicos 92
3.2.10 Estabilidade e fluência Marshall 92
3.2.11 Resistência à Tração por compressão diametral 94
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 97
4.1 Determinação do percentual de betume do CAF 97
4.2 Análises das curvas granulométricas 99
4.3 Caracterização microscópica (MEV) com detector do tipo (EDS) 102
4.4 Determinação das densidades aparente e real e absorção de água do CAF 107
4.1.1 Determinação da densidade máxima teórica (G_{mm}) das misturas 108
4.5 Propriedades volumétricas das misturas compactadas 109
4.6 Estabilidade e fluência Marshall 113
4.7 Resistência à tração por compressão diametral 116
5 ENERGIA DE COMPACTAÇÃO EM MISTURAS MOLDADAS A FRIO 119
6 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO 123
7 CONCLUSÕES 124
8 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS 128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 129
APÊNDICE A: ENTREVISTA (SUDECAP - COORDENAÇÃO DE OBRAS DA CAPITAL) 134

APÊNDICE B: VISITA TÉCNICA (USINA DE ASFALTO - ETROS ENGENHARIA)..... 136
APÊNDICE C: VISITA TÉCNICA À REGIONAL OESTE (SUDECAP) 138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Situação dos revestimentos asfálticos das estradas brasileiras.....18
Figura 2 - Estrutura de pavimento-tipo (a) Execução de revestimento (b) 23
Figura 3 - Tipos de cilindros de fresagem 25
Figura 4 - Espaçamento entre as linhas de corte dos cilindros 25
Figura 5 - Resultados dos tipos de fresagem. 26
Figura 6 - Máquina fresadora e processo de fresagem.....26
Figura 7 - *Layout* viário alterado com uso da microfresagem.....27
Figura 8 - Comparação entre cilindros de fresagem padrão e fresagem fina.....28
Figura 9 - Segregação do CAF na fase de estocagem 31
Figura 10 - Forma de estocagem de CAF em Belo Horizonte.....32
Figura 11 - Aspectos dos ligantes oxidado e rejuvenescido.....33
Figura 12 - Etapas de envelhecimento do ligante asfáltico 34
Figura 13 - Usina tipo *Drum mixer* adaptada com entrada central para CAF.....38
Figura 14 - Processo de produção de mistura asfáltica usinada a quente 39
Figura 15 - Esquema das etapas de produção do REOB.....44
Figura 16 - Esquema de produção de asfalto-borracha (por via úmida) 48
Figura 17 - Evolução da deterioração do pavimento asfáltico.....49
Figura 18 - Deterioração: superficial e estrutural em pavimentação asfáltica 49
Figura 19 - Bulbo de tensões projetado sobre as camadas do pavimento 50
Figura 20 - Tipos de fendas em pavimento asfáltico.....51
Figura 21 - Afundamentos típicos em pavimento asfáltico 52
Figura 22 - Ondulações e escorregamentos na pista de rolamento 53
Figura 23 - Efeitos da exsudação do CAP.....54
Figura 24 - Desgaste por perda de materiais 55
Figura 25 - Panelas ou buracos 56
Figura 26 - Remendos no pavimento asfáltico 56
Figura 27 - Gerenciamento da qualidade de rodagem do pavimento.....58
Figura 28 - Compactação deficiente.....59
Figura 29 - Degraus entre a pista e os elementos de drenagem.....60
Figura 30 - Remendos executados sem critérios técnicos 61

Figura 31 - Sequência construtiva para reparos em pavimentos 62
Figura 32 - Forma de comercialização do asfalto frio.....64
Figura 33 - Fluxograma das etapas da pesquisa experimental 65
Figura 34 - Concreto Asfáltico Fresado (CAF) 67
Figura 35 - Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70) 68
Figura 36 - *Re-refined Engine Oil Bottom* (REOB) 70
Figura 37 - Cal hidratada.....71
Figura 38 - Pó de borracha de pneu.....72
Figura 39 - Equipamento Rotarex (extrator de betume) 74
Figura 40 - Etapas de extração de CAP no aparelho Rotarex.....76
Figura 41 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV- Modelo SSX-550).....81
Figura 42 - *Quick coater* – Metalizadora e amostras metalizadas.....82
Figura 43 - Soquete Marshall 83
Figura 44 - Moldagem a frio dos corpos de prova pela metodologia Marshall 85
Figura 45 - Ensaio de densidade máxima teórica (G_{mm}) 86
Figura 46 - Prensa Marshall e posicionamento do CP 94
Figura 47 - Prensa universal - posicionamento do CP 95
Figura 48 - Resultado dos teores de betume das amostras de CAF.....98
Figura 49 - Peneiramento do CAF sem ligante 100
Figura 50 - Curva granulométrica dos materiais CCB e CSB.....101
Figura 51 - Topografia dos agregados finos (A1-CAF com betume) 103
Figura 52 - Topografia dos agregados finos (A2-CAF sem ligante) 104
Figura 53 - Topografia dos grumos do fresado (A3-CAF com betume).....104
Figura 54 - Topografia dos grumos do fresado (A4-CAF sem betume).....105
Figura 55 - EDS - Agregados finos com CAP (A1) e sem CAP (A2) 106
Figura 56 - EDS - Grumos com CAP (A3) e sem CAP (A4) 106
Figura 57 - EDS pontual regiões A1, A2, A3 e A4.....107
Figura 58 - Propriedades volumétricas das misturas do grupo G1.....110
Figura 59 - Propriedades volumétricas das misturas do grupo G2.....111
Figura 60 - Propriedades volumétricas das misturas do grupo G3.....112
Figura 61 - Resultados dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall 114
Figura 62 - Resistência à tração por compressão diametral 117
Figura 63 - Aspecto dos CP após compactação 119
Figura 64 - Propriedades volumétricas - energia de compactação de 95 golpes....120

Figura 65 - Estabilidade e fluência - energia de compactação de 95 golpes.....121
Figura 66 - Resistência à tração - energia de compactação de 95 golpes.....121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dosagens pesquisadas 66
Tabela 2 - Ficha técnica do CAP 50/70 69
Tabela 3 - Ficha técnica do REOB 70
Tabela 4 - Ficha técnica da cal 71
Tabela 5 - Série de peneiras 77
Tabela 6 - Especificações granulométricas para revestimento asfáltico 78
Tabela 7 - Teores de ligante obtidos das amostras de CAF 98
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de granulometria 100
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de densidade e absorção de água do CAF 107
Tabela 10 - Resultados dos ensaios G_{mm} 108
Tabela 11 - Propriedades volumétricas das misturas compactadas 109
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall 114
Tabela 13 - Resistência à tração por compressão diametral dosagens 116
Tabela 14 - Critério de aceitação para as misturas estudadas 123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARRA	*Asphalt Recycling and Reclaiming Association*
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAF	Concreto Asfáltico Fresado
CARQ	Concreto Asfáltico Reciclado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpos de Prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EDS	Espectrometria de Energia Dispersiva
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MARQ	Mistura Asfáltica Reciclada a Quente
MAUQ	Mistura Asfáltica Usinada a Quente
NBR	Norma Brasileira Registrada
RAP	*Reclaimed Asphalt Pavement*
RCC	Resíduo da Construção Civil
REOB	*Re-refined Engine Oil Bottoms*
SUDECAP	Superintendência de Desenvolvimento da Capital

1 INTRODUÇÃO

Os números divulgados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em relação à situação da superfície dos pavimentos da malha viária brasileira, figura 1, indicam um grande atraso em obras de manutenção rodoviária no país. Mais de 48% das estradas brasileiras estão com algum tipo de desgaste na superfície do pavimento, sendo que 21% dos revestimentos asfálticos apresentam trincas, afundamentos, ondulações e buracos, necessitando de reparos com manutenção corretiva (CNT, 2016).

Figura 1 - Situação dos revestimentos asfálticos das estradas brasileiras

Fonte: CNT (2016)

De acordo com a situação das estradas pavimentadas no Brasil, figura 1, cerca de 57,4% das rodovias brasileiras estão em situação regular, ruim ou péssima, ou seja, mais da metade das vias pavimentadas, no país, necessita de alguma manutenção corretiva imediata. Essa situação de degradação das estradas além de causar prejuízos materiais, coloca a vida das pessoas em risco (CNT, 2016).

A grande demanda por manutenção das vias urbanas e rodovias brasileiras requer, em algumas situações, a execução da fresagem do pavimento asfáltico. No processo de fresagem é gerado o Concreto Asfáltico Fresado (CAF) em grandes volumes, o que configura este processo como uma fonte contínua de geração desse resíduo. O CAF é composto por agregados (brita, areia e pó de pedra) envoltos por uma camada de ligante asfáltico envelhecido. Dentre os benefícios decorrentes da execução de operação de fresagem citam-se: manutenção de alturas de greide da

pista; remoção de camada deteriorada, devido aos abatimentos e trincas; regularização do caimento transversal, para o adequado deflúvio das águas pluviais; correção da superfície da via, proporcionando planicidade, boa rugosidade para adequada aderência entre o pneu e a camada de rolamento. O CAF gerado a partir da manutenção das vias de pavimento flexível de Belo Horizonte e região metropolitana são transportados e armazenados em depósitos a céu aberto, localizados nas nove regionais coordenadas pela Divisão de Manutenção de Vias Públicas da Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP). Essas informações foram obtidas durante entrevista realizada, em agosto de 2016, com o gerente da SUDECAP, o engenheiro Maurício Cangussú Magalhães.

Em Belo Horizonte, o CAF é utilizado em aplicações a frio sem o aproveitamento real do material. Segundo Magalhães (SUDECAP, 2016), o CAF tem sido utilizado como base de pavimentos; material de preenchimento de valas em épocas de chuvas e como revestimento primário de vias não pavimentadas. Esse tipo de aplicação não recicla o ligante asfáltico presente no CAF. O potencial desse resíduo contribui, efetivamente, para viabilidade econômica e preservação do meio ambiente, quando reciclado a quente. No processo de reciclagem a quente aproveitam-se as propriedades do ligante presente no resíduo, material de custo mais elevado na composição de misturas asfálticas. Na reciclagem a quente do CAF reduz-se a demanda por Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e agregados minerais, preservando-se as jazidas naturais desses materiais.

No Brasil, o processo de reciclagem a quente de CAF caminha a passos lentos, talvez, por ainda não ter sido apresentado um ganho econômico real na reciclagem a quente desse material. Há poucos relatos sobre a utilização de reciclagem a quente de CAF no Brasil.

A prefeitura do estado de São Paulo desenvolveu um procedimento para uso de CAF em misturas asfálticas recicladas a quente. Contudo, ainda não se têm registros de tal aplicação (PSP - IE 07/2010).

Um dos obstáculos à reciclagem a quente de CAF no Brasil é a ausência de usinas de produção com aberturas para entrada exclusiva do fresado. Para se vencer esses

obstáculos, são necessários investimentos financeiros em tecnologia de produção de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente (MARQ). A falta de normas; especificações técnicas; profissionais qualificados; conhecimento sobre dosagens ideais e ajustes na temperatura das misturas também são classificados como obstáculos ao uso de CAF em MARQ (BROSSEAUD, 2011).

Segundo Brosseaud (2011), no Brasil não há normas que especifiquem o uso de CAF em MARQ, independente da taxa de resíduo nas misturas. Na opinião do autor, caso houvesse uma boa gestão de CAF, acompanhada de especificações técnicas para a produção das MARQ, as misturas contendo CAF apresentariam o mesmo desempenho de uma mistura nova, constituída de materiais virgens.

Com o objetivo de aumentar a fração de CAF em misturas de Concreto Asfáltico Reciclado a Quente (CARQ), novas usinas de produção de asfalto reciclado têm sido fabricadas nos Estados Unidos e na Alemanha, para atender a produção de misturas com maiores teores de CAF (ZAUMANIS; MALLICK, 2014). Segundo os autores, em vários países de climas variados, diferentes porcentagens de CAF têm sido utilizadas em MARQ, com registro de bons resultados.

Apesar da ampla utilização de CAF em dosagens de misturas asfálticas em vários países. No Brasil ainda não se têm registros sobre a prática ou desempenho da utilização de CAF em misturas de MARQ.

A reciclagem a quente de pequenas quantidades de fresado pode ser viabilizada através da adaptação de betoneiras comuns, utilizadas para mistura de concreto de cimento Portland. Necessita-se apenas de um queimador adaptado na abertura frontal da mesma. Assim, neste estudo, busca-se a reciclagem a quente de 100% de fresado para aplicação a frio em serviços de tapa-buraco. Tais serviços podem demandar pequenas quantidades de material. A aplicação a frio facilita o processo uma vez que permite a estocagem do material pronto para ser utilizado, não necessitando de aquecimento.

1.1 Objetivos da pesquisa

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho físico-mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente com 100% de CAF, com adições de REOB, cal, pó de borracha e ligante virgem, para aplicação a frio em manutenção de vias asfaltadas (operações de tapa-buracos).

1.1.2 Objetivos Específicos

A pesquisa buscou alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Caracterização do CAF para avaliação da viabilidade de reciclagem a quente de 100% do resíduo.
- Identificação do teor ótimo de REOB e ligante virgem a ser adicionado em cada uma das misturas.
- Avaliação da influência de adições de pó de borracha de pneus inservíveis e cal no comportamento físico-mecânico das misturas recicladas.
- Avaliação do comportamento físico-mecânico das diferentes dosagens.

1.2 Justificativa

As motivações para realização dessa pesquisa foram justificadas pela relevância dos seguintes pontos:

- Desenvolvimento de dosagens de misturas asfálticas com 100% de CAF reciclado a quente, com apresentação de características mecânicas de MARQ para aplicação específica.
- Alternativa de material para realização de manutenção de vias asfaltadas (operações de tapa-buracos).
- Processo de reciclagem a quente de CAF viabilizado em pequenos volumes por meio de usinas recicladoras, com adaptação em seu tambor central.
- Vantagens econômicas e ambientais decorrentes da reciclagem a quente do resíduo de CAF.

- Atendimento ao conceito de sustentabilidade em projetos de pavimentação asfáltica reduzindo-se o impacto ambiental, gerado a partir da fresagem asfáltica, proporcionando novo ciclo de vida ao resíduo, por meio da reciclagem a quente. Garantindo, com resultados quantitativos, a qualidade e o desempenho esperados para o uso proposto.

1.3 Desenvolvimento do tema

O tema da pesquisa foi desenvolvido por meio de revisão da literatura; entrevistas com os responsáveis pela manutenção das vias urbanas de Belo Horizonte; visitas técnicas à usina de asfalto próxima à capital e experimentos em laboratórios. A pesquisa bibliográfica foi realizada com estudos de artigos, livros, dissertações de mestrado e teses de doutorados publicados no período de 2006 a 2018.

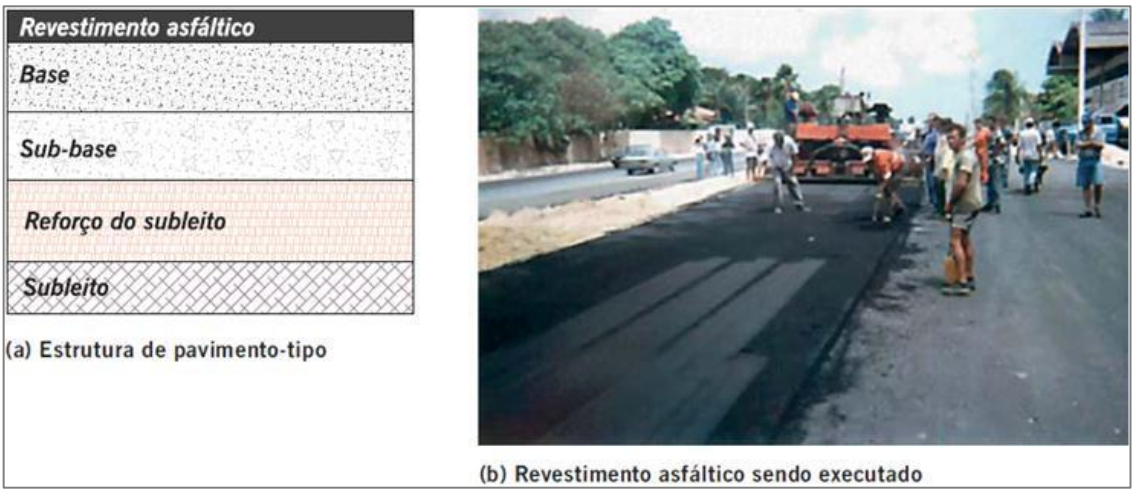
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimentos asfálticos

Os tipos de revestimentos para pavimentação são definidos a partir da avaliação dos resultados de estudos das características de tráfego, clima, custo de materiais, execução, condições de fundação e disponibilidade de materiais. Os revestimentos são, geralmente, classificados em rígido e flexível, em função dos materiais utilizados ou pelo seu comportamento mecânico. Na estrutura do pavimento, o revestimento asfáltico pode ser definido como a camada superficial, também conhecida como camada de rolamento, composta por ligante asfáltico e agregados (brita, areia e pó de pedra). As misturas, compostas por esses materiais, definem as características mecânicas dos revestimentos flexíveis (SANTOS, 2010 apud AGUILAR, 2016).

Balbo (2007) descreve o pavimento como uma estrutura formada por diversas camadas sobrepostas, constituídas por materiais de diferentes granulometrias, destinadas a resistir e distribuir, ao subleito, os esforços horizontais e verticais. Bernucci et al (2008) define o pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, que são construídas ao longo do traçado da via, logo após os serviços de terraplenagem, figura 2.

Figura 2 - Estrutura de pavimento-tipo (a) Execução de revestimento (b)



Fonte: Bernucci et al. (2008)

A estrutura do pavimento tem como finalidade resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima e propiciar aos usuários das vias melhoria nas condições das viagens, como conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2008). Ainda segundo o autor, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são muito importantes para estabilidade estrutural, essas camadas têm a função de limitar os esforços mecânicos, como tensões e deformações na estrutura do pavimento.

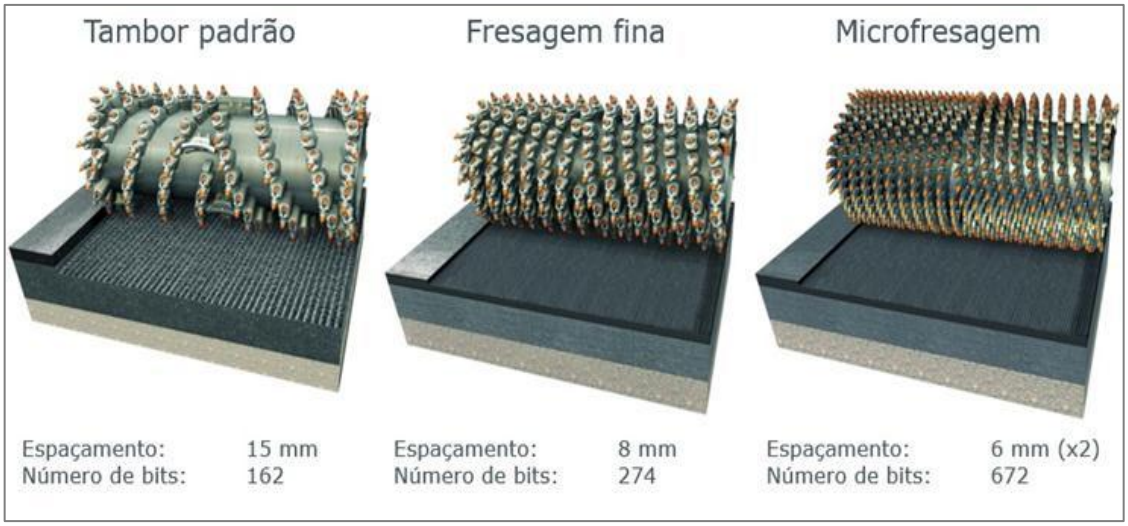
2.2 Processo de fresagem de pavimentos

Durante entrevista realizada em agosto de 2016, Magalhães (SUDECAP, 2016) informou que o processo de fresagem é realizado com o objetivo de restauração da pista de rolamento, sendo uma das etapas de manutenção das vias asfaltadas de Belo Horizonte e região metropolitana. Segundo Magalhães (SUDECAP, 2016), a fresagem da camada de rolamento é indicada quando o diagnóstico de manutenção da via apresenta problemas, como a presença de buracos; abatimentos; trincas generalizadas ou a necessidade de regularização do greide.

No processo de fresagem ocorre a remoção da camada asfáltica envelhecida, gerando o CAF. Para Aguilar (2016, p.11), [...] o CAF é obtido a partir da fresagem apenas da camada superficial do pavimento. Segundo o autor, as fresadoras fazem a raspagem do asfalto em profundidades pré-ajustadas e direcionam todo o material fresado, por meio de esteira deslizante, para um compartimento de carga, geralmente caçambas.

De acordo com Bernucci et al. (2008) e Bonfim (2007), a fresagem é a operação de corte, por uso de máquinas especiais, de parte ou de todo o revestimento asfáltico existente em um trecho de via ou até englobando outra camada do pavimento, como forma de restauração da qualidade do rolamento da superfície ou como melhoria da capacidade de suporte. Os cilindros de corte utilizados nas fresadoras são definidos em função das especificações do projeto de manutenção, figura 3.

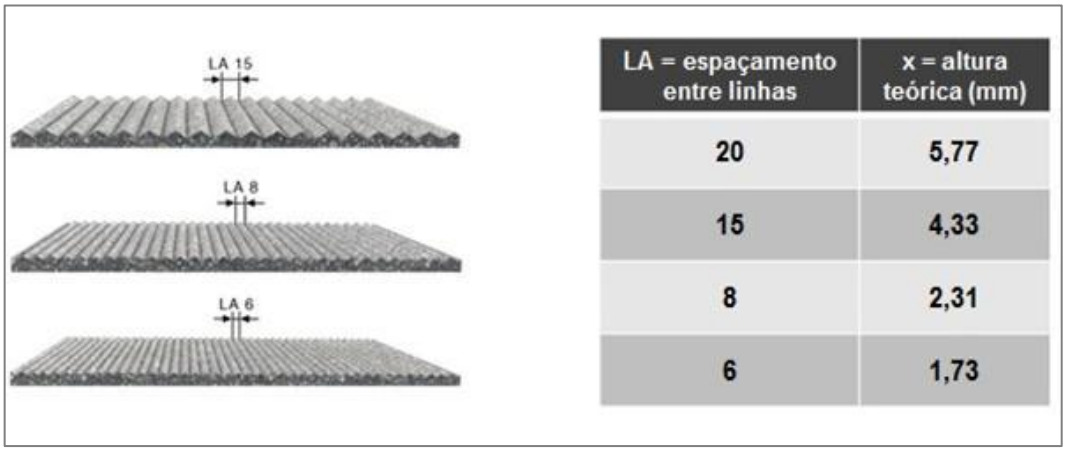
Figura 3 - Tipos de cilindros de fresagem



Fonte: Gewehr (2017)

A velocidade de operação da fresadora e os espaçamentos entre as linhas de corte dos cilindros, figura 4, definem a granulometria do fresado. Esse procedimento no projeto de manutenção define, em parte, a gestão do resíduo (ZAUMANIS, 2014).

Figura 4 - Espaçamento entre as linhas de corte dos cilindros

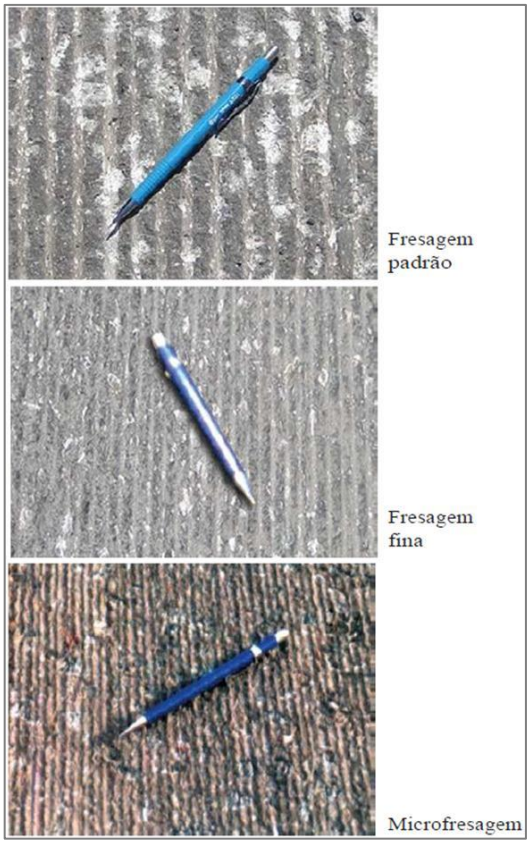


LA = espaçamento entre linhas	x = altura teórica (mm)
20	5,77
15	4,33
8	2,31
6	1,73

Fonte: Gewehr (2017)

As distâncias entre as linhas de corte dos cilindros são padronizadas pelos fabricantes dos equipamentos. Na programação da máquina fresadora, a profundidade de fresagem pode variar desde a espessura da capa asfáltica até a remoção de camadas granulares de base, em uma única passada do cilindro (BONFIM, 2007). A figura 5 ilustra os resultados de alguns tipos de fresagem.

Figura 5 - Resultados dos tipos de fresagem.



Fonte: Bonfim (2007)

Uma máquina fresadora em operação e o processo de fresagem são ilustrados na figura 6, com detalhes para o mecanismo de funcionamento do disco de fresagem e a geração de CAF.

Figura 6 - Máquina fresadora e processo de fresagem

Fonte: Adaptado de Google (2016)

Segundo Aguilar (2016), o CAF gerado a partir das operações de fresagem é um material que possui grande valor agregado. Quando utilizado em misturas asfálticas recicladas a quente, os benefícios são ainda maiores, como a minimização dos impactos ambientais ao reduzir a abertura e ou exploração de novas jazidas, bem como a extração dos ligantes derivados do petróleo; reduz os custos das misturas asfálticas, além de não sobrecarregar os aterros sanitários com esse tipo de resíduo.

2.2.1 Fresagem fina e microfresagem

A microfresagem é definida por Bonfim (2007) como o resultado da fresagem com cilindro dotado de dentes de corte posicionados lateralmente à distância de aproximadamente 2 a 3 mm. Os cilindros de microfresagem são os que possuem o maior número de elementos de corte (bits). Nesse tipo de fresagem, o objetivo não é a remoção da camada do revestimento asfáltico, mas apenas correções de irregularidades superficiais localizadas de até 3,0 cm de profundidade. A microfresagem tem sido indicada para adequação do perfil longitudinal da via ou para alterações no layout viário, como a remoção de pintura de sinalização, conforme ilustrado na figura 7.

Figura 7 - *Layout* viário alterado com uso da microfresagem

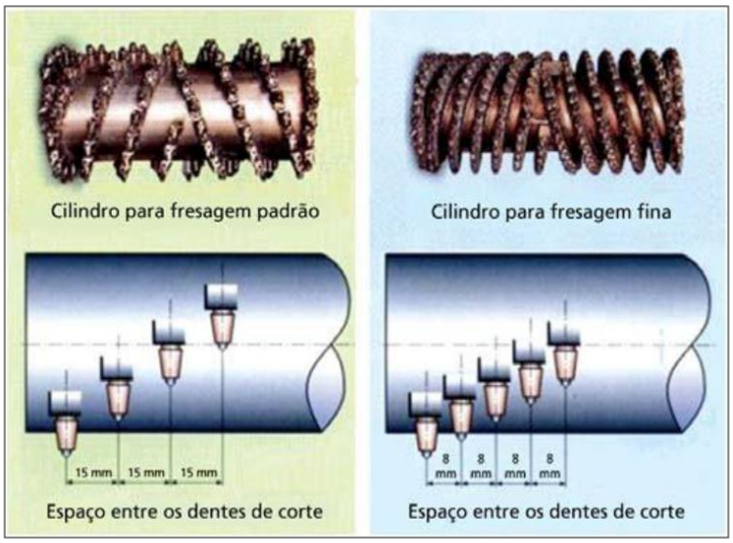
Fonte: Bonfim (2007)

Os cilindros de fresagem fina e microfresagem possuem maiores quantidades de elementos de corte (bits) e menores espaçamentos entre as linhas de corte, em relação ao cilindro de fresagem padrão. A fresagem fina é, geralmente, indicada

para melhorar a aderência pneu-pavimento; corrigir pequenos defeitos no pavimento ou para regularização superficial do revestimento (BONFIM, 2007).

Comparando-se os cilindros de fresagem padrão com o cilindro de fresagem fina, figura 8, percebe-se que o espaçamento reduz de 15,0 mm para 8,0 mm, respectivamente, quase 50% de diferença. Com isso, os sulcos produzidos pelo cilindro de fresagem fina são muito menores, a altura interna teórica dos mesmos é reduzida de 4,33 mm para 2,31 mm, respectivamente. Devido à quantidade de elementos de corte (bits), a fresagem fina não é recomendada em aplicações com profundidade superior a 8,0 cm (BONFIM, 2007).

Figura 8 - Comparação entre cilindros de fresagem padrão e fresagem fina



Fonte: Bonfim (2007)

As variações de tamanho dos espaçamentos dos cilindros de corte indicam a importância da gestão do resíduo no momento da fresagem. Controlar a velocidade de fresagem, bem como escolher corretamente o tipo de cilindro para a espessura do pavimento a ser fresada, resulta em ganhos com prazos e economia nos processos de fabricação das misturas asfálticas, uma etapa de fresagem bem orientada, traz muitos benefícios ao projeto. O engenheiro responsável pela especificação do processo de fresagem deve ficar atento quanto a escolha do cilindro de fresagem, para não comprometer a granulometria do CAF e evitar o aumento dos custos do projeto como etapas de britagem e peneiramento do resíduo (ZAUMANIS, 2014).

2.2.2 Geração de CAF em Belo Horizonte e região metropolitana

Em Belo Horizonte, local onde a pesquisa foi desenvolvida, o CAF gerado a partir da recuperação das vias urbanas é estocado nos depósitos a céu aberto, localizados nas regionais coordenadas pela SUDECAP, informação obtida em entrevista concedida por Magalhães (SUDECAP, 2016). Segundo Magalhães, a quantidade de CAF gerada na capital varia em função do planejamento dos projetos de manutenções das vias.

As obras de manutenção nas vias ocorrem após avaliação técnica dos trechos diagnosticados com problemas que inviabilizam o tráfego. O grau de degradação das vias determina a inserção do processo de fresagem nas etapas do projeto de manutenção. De acordo com Magalhães (SUDECAP, 2016), problemas no pavimento como *grade* final elevado, trincas generalizadas, buracos e abatimentos são fortes motivos para realização da fresagem da camada de rolamento.

Conforme relatado por Magalhães (SUDECAP, 2016), o volume de CAF gerado no processo de fresagem dos grandes corredores urbanos de Belo Horizonte é considerável. Apesar do grande volume de CAF gerado na capital e região metropolitana, o resíduo ainda não possui uma aplicação em que o material possa efetivamente contribuir com a viabilidade econômica e ambiental dos projetos de manutenção rodoviária; já que o fresado é usualmente utilizado como material de preenchimento de recomposição de valas em época de chuvas; em revestimento primário de vias não pavimentadas; como sub-base ou base de pavimentos.

Nesses tipos de aplicações o CAF não é reciclado, pois o fresado é usado a frio, sem passar por nenhum processo de reciclagem. Assim, há apenas o reaproveitamento do material. Dessa forma, o ligante, material de maior custo em misturas asfálticas, presente no CAF não pode ser aproveitado, o que resulta em perda considerável de benefícios econômicos e ambientais.

2.3 Gestão do CAF

Na gestão do resíduo os critérios para realização da fresagem vão desde a orientação de corte, como a especificação da largura, profundidade e velocidade de operação da fresadora até a estocagem do CAF. Zaumanis e Mallick (2014) sugerem a aplicação de gestão no processo de fresagem do CAF, segundo os autores essa prática resulta na redução de custos e prazos em projetos de MARQ. Os autores relatam que as boas práticas de gestão de CAF; usinas modernas; utilização de procedimentos adequados nas dosagens de misturas, acompanhados de soluções tecnológicas inovadoras têm viabilizado a prática de misturas asfálticas com altos teores de CAF. Ainda segundo os autores a boa gestão do resíduo permite melhorar a homogeneização da mistura, reduzindo o teor de finos e a umidade, fatores prejudiciais ao bom desempenho do revestimento.

Conforme relatado por Aguilar (2016, p. 15):

> Normalmente o material fresado contém excesso de material fino, oriundos do processo de fresagem. Um dos fatores que podem contribuir para esta ocorrência é a velocidade da fresagem, sendo que, quanto maior a velocidade de fresagem, maior a quantidade de finos a ser gerada.

De acordo com Ceratti e Reis (2011), a quantidade de partículas finas presentes no CAF pode interferir na homogeneização das misturas, prejudicando a adesividade do ligante, já os minerais argilosos presentes nos agregados do CAF promovem a inclusão de água nas misturas asfálticas reduzindo a resistência e o desempenho do pavimento.

O tipo de máquina fresadora, a espessura a ser fresada e a velocidade de operação de fresagem influenciam na qualidade do resíduo. Para Zaumanis e Mallick (2014), ajustando-se a profundidade a ser fresada e a velocidade de operação da máquina é possível obter a granulometria definida em projeto, o que contribui para otimizar o processo de produção reduzindo-se os custos e tempo com operações de britagem.
De acordo com os autores, existem várias tecnologias disponíveis para a produção de 100% de MARQ. As novas tecnologias de produção tornaram-se conhecidas dos

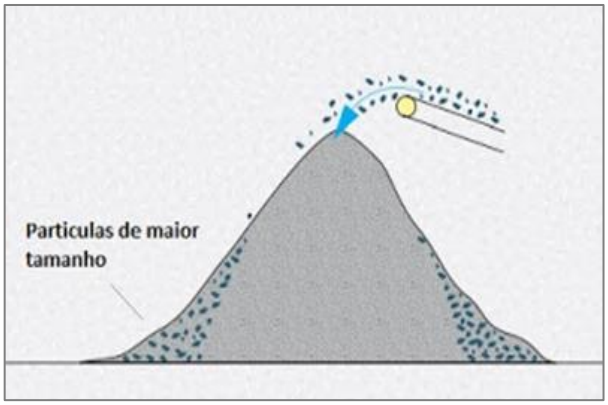
autores durante visitas técnicas nas instalações das usinas de produção de MARQ nos Estados Unidos e em alguns países da Europa.

Para Bernucci et al (2008) e Zaumanis e Mallick (2014), a caracterização do resíduo é fundamental para a qualidade e desempenho do produto final. A Composição dos materiais deve resultar em uma mistura asfáltica que garanta estabilidade estrutural, pelo período de vida útil do pavimento.

2.3.1 Estocagem do resíduo

O adequado armazenamento do resíduo é fundamental para o controle de qualidade do processo de produção de misturas asfálticas contendo CAF. De acordo com Zaumanis e Mallick (2014), a estocagem do resíduo deve ser feita em locais cobertos, com pisos ligeiramente inclinados ou em compartimentos cônicos, para evitar acúmulo de umidade e ou segregação do resíduo, figura 9.

Figura 9 - Segregação do CAF na fase de estocagem



Fonte: Gewehr (2017)

O CAF de diferentes fontes têm propriedades diferentes e por isso, deveriam ser armazenados separadamente, todavia não é assim que é feita a estocagem de CAF em Belo Horizonte. No depósito da Regional Oeste, de onde se coletou o CAF para pesquisa experimental, a estocagem do resíduo é feita em pilhas a céu aberto, conforme ilustrado na figura 10. Por não aplicar as técnicas adequadas de gestão do resíduo, as condições de armazenamento do CAF podem comprometer alguns resultados, já que o resíduo fica exposto ao intemperismo e contaminações com material orgânico.

De acordo com Arantes (SUDECAP, 2017), não há registros sobre o tempo de exposição do material ao intemperismo e tão pouco sobre os locais e datas específicas das obras de manutenção realizadas, que geraram o fresado em estoque.

Figura 10 - Forma de estocagem de CAF em Belo Horizonte

Fonte: Autora (2017)

A estocagem do material a céu aberto, por longos períodos, aumenta o grau de oxidação do CAP presente no CAF e o teor de umidade do resíduo, além de contaminar o fresado com material orgânico. Quando não houver áreas de estocagem cobertas para abrigar o resíduo, Zaumanis e Mallick (2014) sugerem, em caso de necessidade de britagem e peneiramento do CAF, que estes processos sejam realizados no dia de uso do material, como forma de limitar a umidade, já que os altos teores de umidade elevam os custos de secagem e de aquecimento da mistura, além de reduzir as taxas de produção das usinas.

2.3.2 Envelhecimento do ligante asfáltico

O CAF é composto, basicamente, por agregados (brita, areia e pó de pedra) e ligante asfáltico oxidado. O ligante envelhecido do CAF pode ter suas propriedades recuperadas com agentes de reciclagem, conhecidos como rejuvenescedores. A figura 11 ilustra aspectos dos ligantes oxidado e rejuvenescido.

Figura 11 - Aspectos dos ligantes oxidado e rejuvenescido

Fonte: Muench (2016)

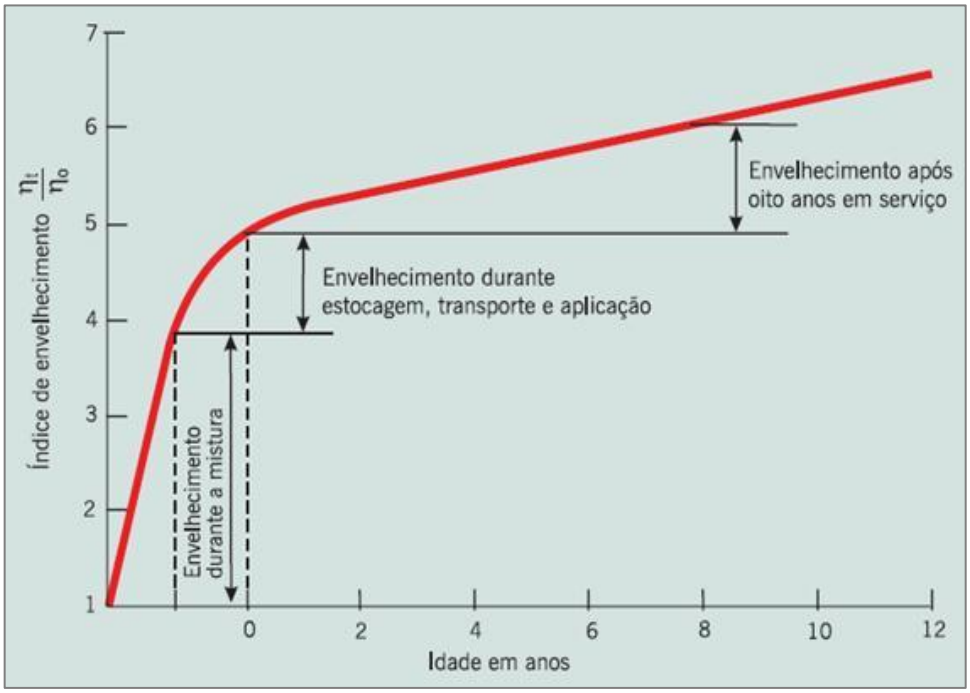
Foi citado por Tonial et al. (2001) apud Aguilar (2016) que, com o conhecimento da espessura da película de ligante que envolve o agregado, é possível determinar se o envelhecimento do CAP é de curto ou longo prazo.

A oxidação ou envelhecimento do ligante ocorre em curto e em longo prazo. Segundo os autores Aguilar (2016), Bernucci et al. (2008), Zaumanis e Mallick (2014), a maior taxa de degradação do CAP acontece ainda na fase de preparo da mistura e está relacionada à composição química do ligante: asfaltenos, parte insolúvel e maltenos, parte solúvel. A fase maltene é composta pelos principais agentes que influenciam o processo de envelhecimento, que são os hidrocarbonetos saturados, aromáticos e resinas. Nesta fase, as reações químicas que envelhecem o ligante ocorrem com o aumento da temperatura da mistura, que favorece as reações de oxidação com o oxigênio da atmosfera e com a volatilização da fração maltene.

O envelhecimento de curto prazo ocorre já no preparo da mistura, quando o CAP é adicionado aos agregados superaquecidos. A oxidação do ligante aumenta à medida que a mistura passa pelas etapas de transporte, estocagem a altas temperaturas e sua aplicação *in situ*. O envelhecimento de longo prazo ocorre ao longo de toda vida útil da camada de rolamento, pela ação de intempéries; a contribuição do índice de vazios no pavimento e pelo aumento da viscosidade, que resulta em aumento de rigidez propiciando o aparecimento de trincas e abatimentos na camada de rolamento, Zaumanis e Mallick (2014).

A figura 12 ilustra as etapas de envelhecimento do asfalto. O envelhecimento de curto prazo caracterizado pela fabricação, estocagem, transporte e aplicação da mistura e o de longo prazo pelo período de operação da via. Segundo Bernucci et al. (2008), a maior taxa de oxidação das misturas asfálticas ocorre no processo de usinagem a quente, com consequente modificação de suas propriedades físicas, químicas e reológicas.

Figura 12 - Etapas de envelhecimento do ligante asfáltico



Fonte: Bernucci et al. (2008)

As etapas de envelhecimento dos ligantes betuminosos são determinadas pelo percentual de viscosidade das misturas, definido pela razão entre as viscosidades anterior e posterior ao processo de envelhecimento (BARROS, 2012; BERNUCCI et. al., 2008).

Segundo Barros (2012), o fenômeno conhecido como envelhecimento do betume está associado ao endurecimento da mistura, o que provoca um aumento significativo da viscosidade, devido às alterações na composição que o betume está sujeito ao longo da vida útil do revestimento. O índice de envelhecimento do CAP é uma propriedade física do betume, que reduz a interação do ligante com os agregados, por aumentar a rigidez da mistura.

2.4 Processo de reciclagem a quente de CAF

O CAF é um resíduo gerado em abundância em operações de manutenção de rodovias e vias urbanas, mas ainda não tem sido empregado em seu uso mais proveitoso: a reciclagem a quente.

> A reciclagem a quente é o processo em que parte ou todo o revestimento asfáltico é retirado e reduzido a dimensões apropriadas, onde em seguida é misturado a quente, podendo ser realizado no próprio local ou em usina estacionária. Este processo pode ainda incluir a adição de novos agregados, CAP e agentes rejuvenescedores (FREIRE, 2014, p. 04).

No processo de reciclagem a quente, o ligante presente no CAF, material de maior custo, é aproveitado reduzindo-se as frações de materiais virgens, contribuindo com a preservação das fontes naturais dos materiais e inserindo a construção de pavimentos asfálticos no conceito de obras sustentáveis.

> A associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (The Asphalt Recycling and Reclaiming Association – ARRA) cita que existem atualmente cinco categorias principais de diferentes métodos de reciclagem: a frio (cold planning); a quente (hot recycling); a quente in situ (hot in-place recycling); a frio in situ (cold in-place recycling); e também o processo de reciclagem que envolve a reutilização do fresado como camada de base do pavimento (full depth reclamation) (AGUILAR, 2016, p. 11).

A reciclagem a quente do CAF contribui para a preservação ambiental de forma mais eficiente; a partir do momento em que aproveita as propriedades de aglutinação do ligante enrijecido, minimizando a demanda por petróleo e agregados minerais (AGUILAR, 2016).

Para Silva (2008) apud Reis (2013) “Um dos principais pontos da reciclagem é a extração do ligante envelhecido, pois se faz necessário usar um método de extração e recuperação do CAP envelhecido sem que se alterem as suas propriedades”.

2.4.1 Caracterização do fresado

Selecionar e caracterizar o resíduo são ações fundamentais para obtenção da qualidade e bom desempenho das misturas asfálticas. Para conhecimento das propriedades dos materiais presentes no CAF é recomendado a realização de

ensaios de caracterização física, como a determinação do teor de betume, a densidade dos agregados e análises granulométricas. As curvas granulométricas devem ser bem definidas para que haja melhor homogeneização dos materiais envolvidos nas misturas (ZAUMANIS e MALLICK, 2014).

O CAF utilizado na pesquisa contém quantidade significativa de material fino, proveniente do processo de fresagem. Para Zaumanis e Mallick (2014), o excesso de material fino presente no CAF pode ser prejudicial à mistura asfáltica e acrescenta custos ao projeto. Segundo os autores, para se garantir a homogeneização de todos os materiais envolvidos na dosagem é necessário o aumento do teor de CAP. A presença de finos em grande quantidade no fresado inviabiliza o aumento da porcentagem de CAF em MARQ. Os autores afirmam que o excesso de material fino pode ser evitado por meio de controle da velocidade de fresagem, sendo que velocidades altas geram maiores quantidades de finos.

Segundo Bardini et al. (2012); Zaumanis e Mallick (2014), quando a fresagem do revestimento não é realizada segundo os critérios de gestão para esse tipo de resíduo, o CAF deve passar pelos processos de britagem e ou peneiramento para separação em duas ou mais granulometrias, esses processos permitem uma maior adição de fresado à mistura. Contudo, pode não ser viável economicamente.

2.4.2 Microcaracterização do fresado

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica complementar aos experimentos, que permite a visualização da morfologia da superfície dos materiais identificando pontos de porosidade na superfície das amostras e a distribuição de CAP entre os agregados. Segundo Devavid (2007), no processo de formação das imagens, a área analisada é irradiada por um fino feixe de elétrons. Como resultado da interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra, uma série de radiações é emitida (Elétrons Secundários - ES; Elétrons Retroespalhados - ERE, raios - X característicos). Estas radiações quando captadas corretamente fornecem informações características sobre a amostra, tais como morfologia da superfície; composição e cristalografia.

O MEV tem seu potencial ainda mais desenvolvido com a adaptação na câmara da amostra de Detector de Energia Dispersiva (EDS) permitindo a realização de análise química das amostras sólidas. Os microconstituintes presentes nas amostras dos materiais são identificados por meio do detector de raios X do tipo EDS, instalado na câmara de vácuo do MEV. O EDS faz a contagem e a identificação das radiações emitidas, comparando-as com energias típicas de cada átomo. Dessa forma são gerados os espectros característicos que representam os elementos químicos presentes na amostra (DEDAVID, 2007).

2.4.3 Usinas para reciclagem a quente de CAF

A produção típica de misturas asfálticas contendo CAF é realizada mediante o superaquecimento dos agregados virgens, que ao entrarem em contato com o CAF promovem a secagem e o aquecimento do resíduo por condução. Dessa forma, evita-se o aumento da oxidação do CAP pela exposição direta do resíduo à chama (ZAUMANIS e MALLICK, 2014).

Algumas usinas de asfalto limitam o teor de CAF na produção das misturas, como é o caso da usina de lote, que permite no máximo 20% de CAF. Para Zaumanis e Mallick (2014) este percentual pode ser aumentando com algumas adaptações nesse tipo de usina. Há relatos de misturas asfálticas com o uso de 50% de CAF, produzidas em usinas do tipo *Drum mixer*, com boa homogeneização e bom desempenho.

> Os misturadores de tambor do tipo *Drum mixer* foram efetivamente utilizados para reciclagem ao longo dos anos 70 e 80. Entretanto, em função das crescentes restrições de normas americanas sobre as emissões àquela época, estas plantas foram muito criticadas devido ao fato de causar a produção de emissões poluentes. *Pavement Recycling Guidelines* (1987) evidencia que este problema de emissões poderia ser resolvido através de vários processos; tais como a redução da taxa de produção de mistura reciclada; redução do teor de água do CAF; diminuição da temperatura de descarga da mistura reciclada; utilização de menor percentual de fresado; entretanto a forma mais eficaz e que garantiria maior produção seria modificar o projeto deste tipo de usina; adaptando às necessidades do material a ser reciclado. Desta forma, foram construídas várias versões modificando estas usinas para combater o problema da emissão (KANDHAL e MALLICK, 1997 apud AGUILAR, 2014).

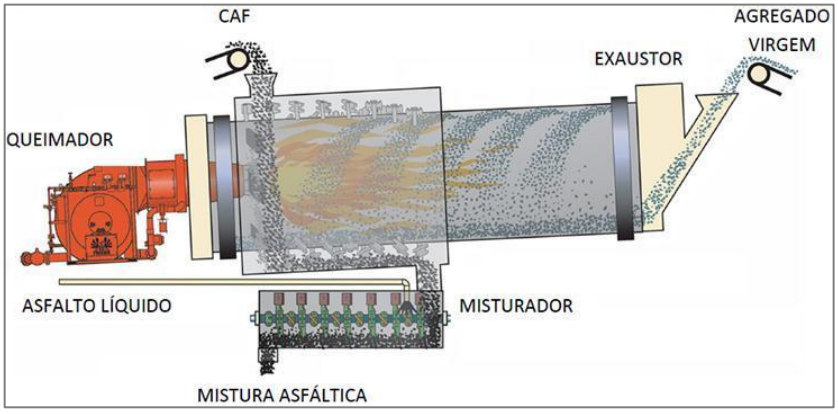
Devido à presença de CAP oxidado no CAF, o fresado não pode ser introduzido pela mesma entrada de agregados virgens nas usinas, para não sofrer queima do ligante presente no resíduo. Contudo, as usinas, que não possuem a entrada para o CAF, podem ser adaptadas com entrada específica para o fresado.

Segundo Kandhal e Mallick (1997) apud Aguilar (2016):

> As usinas *Drum mixer* quando não são projetadas para o recebimento de CAF podem ser adaptadas para tal função através da abertura de entrada central para recebimento do material a ser reciclado. Tal abertura permite que o CAF entre no tambor secador em uma zona onde a temperatura não ultrapassa os limites demandados pelo ligante asfáltico e não tenha contato com as chamas. De acordo com *Proven Guidelines for Hot-Mix Recycling* (1986), neste tambor o CAF entrará em contado com os agregados virgens já aquecidos e secos a jusante da chama do queimador, sendo que estes aquecerão por condução térmica o material a ser reciclado. Dentro destes tambores existem barramentos que ajudarão a aumentar o tempo de permanência total do agregado na primeira metade do cilindro, a zona quente, o que permitirá que o material virgem seja aquecido cerca de 260º.

No processo de produção de MARQ, após o superaquecimento dos agregados virgens e o contato destes com o CAF, o CAP virgem e ou o rejuvenescedor é adicionado e misturado aos demais materiais, conforme ilustrado na figura 13.

Figura 13 - Usina tipo *Drum mixer* adaptada com entrada central para CAF



Fonte: Astec (2016)

Zaumanis e Mallick (2014) mostram em suas pesquisas que, nos mercados da Europa e dos Estados Unidos, já existem usinas que permitem a reciclagem de 100% de CAF. Contudo, os autores relatam que os bons resultados do uso de altos teores de CAF não são bem documentados, o que contribui para inviabilizar o aumento de CAF em MARQ.

O processo de produção de Misturas Asfálticas Usinadas a Quente (MAUQ), com a utilização de materiais virgens, foi acompanhado durante a visita à usina de asfalto da empresa Etros Engenharia Ltda, localizada em São José da Lapa, região metropolitana de Belo Horizonte-MG. A empresa é responsável pela execução das obras de pavimentação do quilômetro 3, da rodovia Inácia de Carvalho. Um pequeno relatório fotográfico, figura 14, foi elaborado para ilustrar as etapas do processo de produção de MAUQ, realizado na usina.

Figura 14 - Processo de produção de mistura asfáltica usinada a quente

Fonte: Autora (2017)

Na ocasião da visita à usina de asfalto, foi realizada uma entrevista com o engenheiro Alexandre Reis, responsável pela execução da obra. Segundo Reis (2017), devido ao período de chuvas, a mistura que estava sendo fabricada, no dia da visita, seria para aplicação em operações de “tapa-buracos”.

De acordo com Reis (2017), a reciclagem de CAF ainda não faz parte dos projetos de misturas asfálticas da empresa; tanto pela questão de adaptações que seriam necessárias nas usinas, quanto pelo os cuidados ambientais decorrentes das emissões que são geradas pelo processo de reciclagem de CAF. Para o engenheiro, ainda não há interesse na reciclagem de CAF, por falta de conhecimento de dosagens com incorporação do resíduo, bem como a ausência de processos de produção de misturas recicladas a quente.

Para Reis (2017), a falta de informações sobre MARQ aplicadas em obras de pavimentação asfáltica no Brasil, que comprovem o bom desempenho e durabilidade em relação às misturas especificadas e ou com dosagens padronizadas, também contribui para manter a resistência dos responsáveis pelos projetos de MAUQ, em não realizar misturas que inclua a reciclagem de CAF.

Na literatura pesquisada, as restrições ao uso de CAF vêm da falta de capacidade de produção das usinas e da ausência de gestão do fresado, impedindo o seu uso, por excessos de contaminações, umidade e ou material pulverulento (ZAUMANIS e MALLICK, 2014).

2.4.4 Viabilidade econômica-ambiental na produção de MARQ

De acordo com Aguilar (2016, p. 29), o resíduo (CAF), gerado no processo de fresagem de pavimentos asfálticos, pode ser definido como:

> [...] um resíduo da construção civil-RCC e estes resíduos pertencem a Classe II B, conforme NBR 10.004, entretanto o CONAMA 307/2002 e 348/2004 subdividem os resíduos da construção civil em quatro outras classes, respectivamente (A, B, C e D); sendo o asfalto enquadrado na Classe B, na qual é identificado como material reciclável para outras destinações os quais deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados as áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

Os avanços tecnológicos das usinas de produção permitiram proteger o CAF do contato com as chamas e a controlar as emissões com modernos controles de poluição, isso aumentou a porcentagem de CAF em MARQ, com apresentação de desempenho satisfatório (ZAUMANIS e MALLICK, 2014).

A preservação ambiental é evidente na reciclagem de CAF, no que diz respeito à exploração de jazidas naturais de rocha e extração de petróleo. Outro ponto positivo para o meio ambiente é a não designação do resíduo para os aterros sanitários e ou seu acúmulo em locais impróprios, essa ação também configura uma forma de mitigação de danos ao meio ambiente. Essas ações ambientais inserem a construção de pavimentos asfálticos reciclados no conceito de obras sustentáveis.

A vantagem econômica mais evidente do uso ou aumento do teor de CAF em MARQ vem da redução de adição de betume à mistura ou mesmo da substituição do ligante virgem, por um rejuvenescedor. De acordo com Zaumanis e Mallick (2014), nos Estados Unidos o ligante virgem custava, à época de suas pesquisas, cerca de U$540 a tonelada e o CAF custava cerca de U$5 a tonelada, sendo que em algumas regiões o CAF poderia ser obtido sem custo algum.

Segundo os autores, as misturas asfálticas com incorporação de 50% de CAF apresentaram 24% de redução nos custos dos projetos. Em outras pesquisas realizadas pelos autores foram encontrados percentuais de 26% e 35% de redução nos custos, com uso de 50% de CAF nas dosagens das misturas.

2.5 Agentes de reciclagem

Roberts et al. (1996) apud Zaumanis e Mallick (2014) define os agentes de reciclagem como lubrificantes, cuja função é propiciar à mistura asfáltica um sistema homogêneo, onde a parte sólida do ligante (asfalteno) seja bem homogeneizada, para impedir sua precipitação ou floculação. Para os autores, a volatilização dos maltenos, parte líquida do asfalto, é o principal fator no processo de envelhecimento de curto prazo.

A rápida oxidação que ocorre na mistura asfáltica, antes mesmo de sua aplicação como camada de rolamento, está relacionada à composição química do ligante asfáltico, isto é; a fração de asfaltenos e a fração de maltenos, que são os principais agentes no processo de envelhecimento do CAP (KARLSSON e ISACSSON, 2006 apud ZAUMANIS e MALLICK, 2014). Em suas pesquisas, os autores perceberam que a estabilidade da mistura, quanto ao envelhecimento, depende da solubilidade dos agentes de reciclagem.

Segundo Bernucci et al. (2008), apesar da baixa reatividade química do asfalto betuminoso, essa característica não o protege contra o processo de oxidação quando entra em contato com o ar e a água.

Para Yu et al. (2014), os agentes de reciclagem, também conhecidos por rejuvenescedores, são utilizados para recuperar as propriedades reológicas do ligante envelhecido e reconstituir a composição química do material oxidado, assegurando a durabilidade e o bom desempenho do revestimento.

De acordo com Zaumanis e Mallick (2014), os agentes de reciclagem emolientes são exclusivamente destinados a reduzir a viscosidade do ligante presente no CAF. Ainda segundo os autores, os resultados de alguns ensaios mostraram que o uso de ligante virgem mais fluído melhorou a resistência do revestimento à fissuração.

2.5.1 *Re-refined Engine Oil Bottom* (REOB) como agente de reciclagem

O REOB é uma das siglas americanas utilizadas para dar nome ao subproduto obtido no processo industrial de rerrefino de óleo lubrificante automotivo usado ou contaminado. Esse material foi utilizado nas misturas asfálticas da pesquisa com o objetivo de rejuvenescer e restaurar as propriedades do CAP oxidado presente no fresado, bem como manter a trabalhabilidade das misturas em temperatura ambiente.

O *Asphalt Institute* (2015) se refere ao óleo automotivo reciclado e rerrefinado, apenas como REOB, mas as opções de nomeação para o óleo automotivo

rerrefinado variam em função dos interesses dos fabricantes e pesquisadores, que adotam os seguintes nomes para o produto.

- RVTB - *Re-Refined Vacuum Tower Bottoms* (*Heritage Research Group*).
- WEOR - *Waste Engine Oil Residue* (*Queens University*).
- WODB - *Waste Oil Distillation Bottoms*, Herrington (1993).
- RHVDOB - *Re-Refined Heavy Vacuum Distillation Oil Bottom*, (D'Angelo).
- VTAE - *Asphalt Flux, Asphalt Extender, Asphalt Blowdown, Vacuum Tower Asphalt Extender* (*National Oil Recyclers Association* - NORA).

De acordo com as pesquisas bibliográficas realizadas, há poucas informações sobre o uso de REOB em misturas asfálticas recicladas. O *Asphalt Institute* (2015), um dos órgãos americanos que regulamenta e aprova as obras de infraestrutura rodoviária nos Estados Unidos, apesar de apoiar as modificações em misturas asfálticas que viabilize os custos e a qualidade dos projetos, ainda não possui nenhuma especificação e ou recomendação para o uso do REOB.

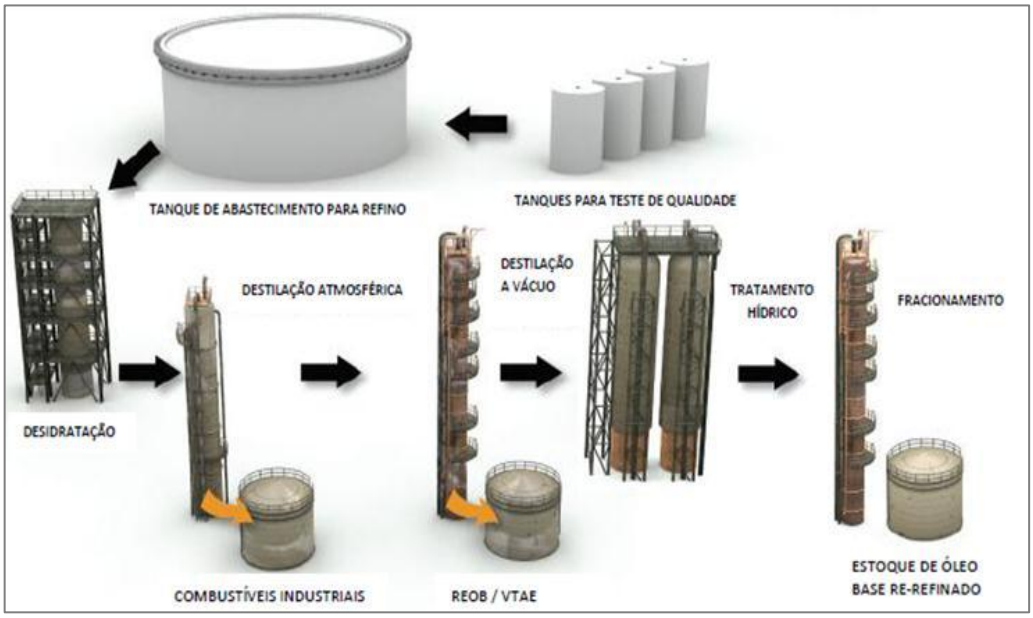
Segundo Buncher (2014) o *Asphalt Institute* formou um grupo de estudos, com os interessados em pesquisar os efeitos do REOB em misturas asfálticas recicladas a quente. Os seguintes objetivos foram estabelecidos para o grupo de estudos, formado por fabricantes e pesquisadores:

- Sintetizar a literatura.
- Definir a composição do produto.
- Estabelecer benefícios, considerações e melhores práticas para o uso do produto.

De acordo com Buncher (2014), o REOB é um resíduo que vem sendo utilizado há mais de 30 anos, como agente modificador de misturas asfálticas, por melhorar o seu grau de desempenho "PG" (*Performance Grade*). Com o aumento do uso de elevados teores de CAF em misturas asfálticas ocorre grande demanda por tipos mais fluídos de rejuvenescedores, como é o caso do REOB.

De acordo com *Asphalt Institute* (2015); Buncher (2014); Herrington et. al. (1993), o REOB é um produto que resulta do processamento de óleo lubrificante usado de motores de veículos, que passa por rerrefino utilizando-se a destilação atmosférica, seguida de destilação a vácuo. Segundo os autores, o subprodutо obtido a partir desse processo deve ser homogêneo e livre de água. Um esquema das etapas de produção do REOB está ilustrado na figura 15.

Figura 15 - Esquema das etapas de produção do REOB



Fonte: *Asphalt Institute* (2015)

A preocupação de alguns projetistas em usar o REOB como um modificador de CAP vem de algumas experiências negativas, talvez o fato tenha acontecido por dosagens inadequadas. Entretanto, há pesquisadores que obtiveram bons resultados no uso do produto em seus experimentos (BUNCHER, 2014).

Em resultados de pesquisas realizadas pela AASHTO, aproximadamente, metade dos estados nos EUA estava recebendo ligantes modificados com REOB. A maioria dos estados nos EUA considera o REOB como um agente de reciclagem modificador de CAP. Contudo, os fabricantes do produto não registraram o REOB, como um modificador de ligantes betuminosos, *Asphalt Institute* (2015).

As opiniões sobre o uso de REOB, como agente de reciclagem, em misturas asfálticas, estão bem divididas. Nos resultados das pesquisas estudadas, cerca de 50% relataram em seus trabalhos que o uso do REOB é prejudicial ao desempenho do pavimento, os outros 50% afirmam que a incorporação de REOB nas misturas asfálticas melhorou ou manteve o desempenho do pavimento.

Herrington et. al. (1993) em um dos seus trabalhos publicados sobre o uso de REOB em misturas asfálticas, denominou o resíduo de *Waste Oil Distillation Bottoms* (WODB). Nas misturas em que utilizou 9% e 20% de REOB os resultados dos ensaios de campo, realizados por um período de 14 meses, apresentaram desempenho semelhante ao da mistura de referência. Além disso, o autor ainda relata que não houve problemas no processo construtivo.

2.6 A Cal utilizada como aditivo

A cal tem sido utilizada como aditivo em misturas asfálticas há muito tempo, mas foi na década de 70 nos EUA, que houve um grande interesse pelo uso da cal, devido à crise do petróleo em 1973. A partir dessa década a cal se tornou um dos aditivos mais utilizados em misturas asfálticas, Mouillet (2014). Segundo o autor, a cal é conhecida por reduzir a oxidação do betume, além de enrijecer mais o mastique do que os demais fíleres minerais e impactar de forma positiva a durabilidade das misturas asfálticas, retardando o fraturamento da camada de rolamento.

Nos últimos anos tem aumentado o interesse e o uso da cal hidratada, como agente estabilizante de misturas asfálticas recicladas a quente, em diversos países da Europa e nos EUA. Nas pesquisas realizadas por Mouillet (2014), foi verificado que as agências dos EUA estimam que a adição entre 1% e 1,5% de cal em misturas asfálticas aumentam a vida útil do pavimento entre 2 e 10 anos, o que corresponde ao percentual de 20% a 50%, além de melhorar a adesividade entre o agregado e o ligante. Em pesquisas realizadas na França, a incorporação de cal em misturas asfálticas aumentou a durabilidade do pavimento em cerca de 20% a 25%.

Os resultados da pesquisa de Bock (2009), realizada com uma mistura asfáltica de referência e cinco diferentes formas de adição de cal em dosagens asfálticas,

mostraram que em todas as misturas, onde houve a incorporação de cal, ocorreu redução significativa do ligante (14,47%). Confirmando, com os experimentos realizados, a redução de custos na produção do revestimento asfáltico, pela redução da quantidade de CAP nas misturas.

Segundo Bock (2009) a adição de cal em dosagens asfálticas melhora a adesividade entre o agregado graúdo e o ligante; reduz a oxidação da mistura elevando a vida útil do pavimento; diminui a degradação por trincamento, por melhorar a elasticidade, além de ser viável economicamente. Em sua pesquisa, o autor, relata ter conseguido reduzir a rigidez das misturas asfálticas ensaiadas, tornando-as mais elásticas, o que preserva a resistência à tração e consequentemente a resistência à ruptura.

Por reduzir o índice de vazios da mistura e ter alto poder alcalino, a cal retarda a oxidação do asfalto, provocada pela ação do calor, da água e do ar, além de diminui a sensibilidade térmica do revestimento asfáltico. Segundo Bock (2009) e Mouillet (2014), a cal atribui ao CAP maior viscosidade e impermeabilidade, tornando a mistura mais resistente às variações de temperatura e aos períodos prolongados de chuvas. Os autores indicam porcentagens de adição de cal hidratada, normalmente, até 1,5% em peso da mistura asfáltica.

2.7 Pó de borracha como modificador de mistura asfáltica

A incorporação de pó de borracha em misturas asfálticas tem sido testada por muitos pesquisadores, por conferir maior durabilidade ao pavimento. Digiulio (2007) relata em sua pesquisa, que os primeiros registros de experimentos de misturas asfálticas com incorporação de pó de borracha surgiram nos Estados Unidos na década de 60. Na ocasião, a mistura reciclada a quente, com adição de pó de borracha, foi utilizada em operações de tapa-buracos.

O uso de pó de borracha em pavimentos asfálticos se destaca pelo potencial de consumo de pneus inservíveis. Para cada tonelada de mistura asfáltica são adicionados o pó de borracha de 1 a 4 pneus de veículos de passeio. Segundo Bertollo et al. (2002), seria necessário aproximadamente 11 milhões de pneus inservíveis, cerca de 25% dos pneus descartados a cada ano, para pavimentar cerca

de 7.800 km de rodovia. De acordo com Leão (2013), um pneu de um veículo de passeio tem mais de 45% de elastômeros em sua composição.

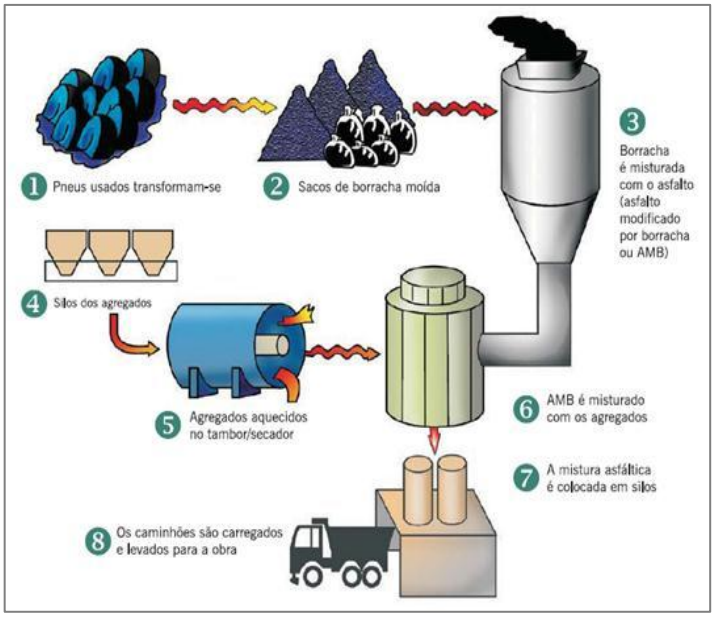
O processo de reciclagem de pneus envolve um ciclo que compreende coleta, transporte, trituração e separação de seus componentes. Segundo os autores Lopes e Wagner (2016); Bertollo et al. (2002) há um grande ganho socioambiental ao utilizar a borracha de pneus inservíveis em projetos de misturas asfálticas. A reciclagem dos pneus de borracha promove a geração de empregos e evita o descarte inadequado do resíduo, preservando o meio ambiente e a vida da população.

Os resultados de algumas pesquisas mostraram que a incorporação de pó de borracha ao ligante asfáltico, agrega novas propriedades à mistura, promovendo uma melhoria significativa ao revestimento. O asfalto-borracha, como é mais conhecido, apresenta maior viscosidade, portanto possui menor fluidez. De acordo com Leão (2013) e Bernucci et al. (2008), a adição de pó de borracha atua como um agente modificador do ligante. Ainda segundo Leão (2013), as misturas asfálticas recicladas a quente com adição de pó de borracha apresentam as seguintes vantagens em relação às misturas convencionais:

- Aumento da aderência entre os pneus dos veículos e a pista de rolamento.
- Aumento da resistência e consequentemente aumento da vida útil do pavimento.
- Redução das deformações permanentes, por possuir maior elasticidade.
- Redução de trincamento precoce por fadiga, por possuir melhor suscetibilidade térmica.

Segundo Bernucci et al. (2008), a incorporação de pó de borracha pode ocorrer por processo via seco, na forma triturada compondo parte da fração de agregados pétreos da mistura asfáltica ou por via úmida, conforme ilustrado na figura 16, quando o pó de borracha é adicionado ao CAP aquecido, modificando as propriedades do ligante.

Figura 16 - Esquema de produção de asfalto-borracha (por via úmida)



Fonte: Bernucci et al. (2008)

A temperatura para aquecimento do CAP, com incorporação de pó de borracha, dependerá da viscosidade do ligante, especificada pelo fabricante, Bernucci et al. (2008).

2.8 Patologias de pavimentos asfálticos

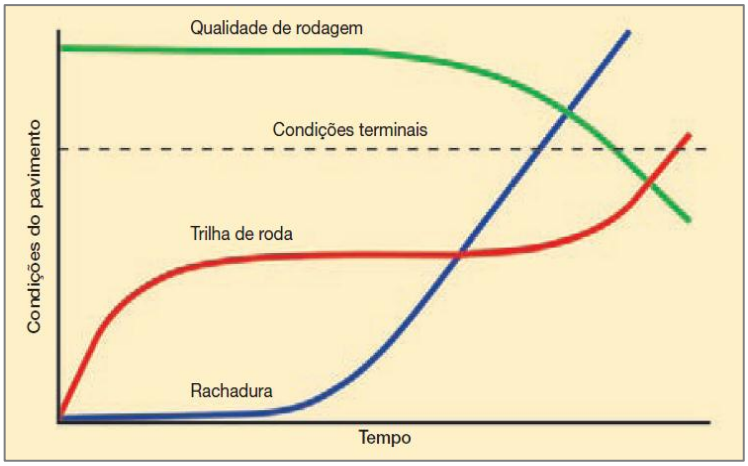
As ruas e estradas, com superfície de revestimento asfáltico deteriorado, fazem parte das estatísticas sobre a situação e qualidade das obras de infraestrutura rodoviária no Brasil. Passar por ruas e ou estradas com algum tipo de defeito na superfície do pavimento configura um problema comum, em muitas cidades brasileiras, (CNT, 2016).

Segundo Padula (2002), a situação desfavorável das rodovias brasileiras além de comprometer a segurança dos usuários da via, com grandes probabilidades de sérios acidentes; ainda causam prejuízos financeiros aos motoristas, com surgimento de problemas na estrutura dos veículos, promovendo a redução de sua vida útil.

As obras rodoviárias têm vida útil definida em projeto. Elas passam pelo processo natural de desgaste e envelhecimento. A deterioração de pavimentos asfálticos tem

gerado grandes transtornos e prejuízos à população. Os serviços de manutenção são necessários para melhorar a trafegabilidade, o conforto aos motoristas e, de modo geral, a qualidade de vida da população, (PADULA, 2002). No gráfico da figura 17 é apresentada a evolução da deterioração do pavimento asfáltico.

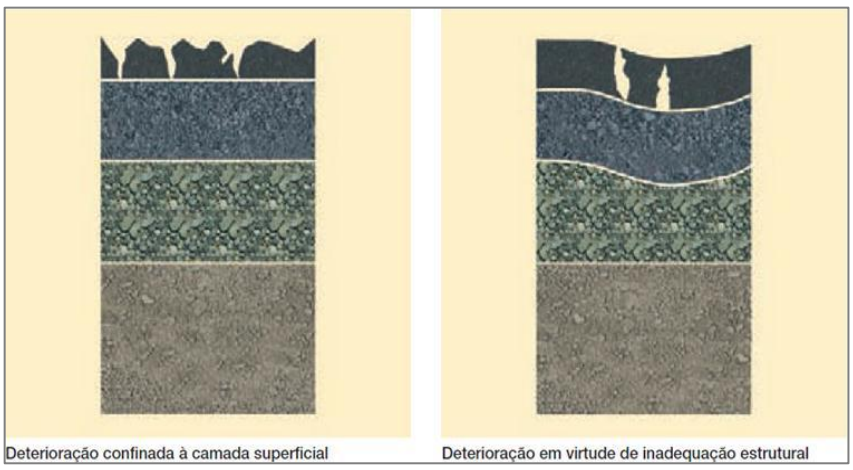
Figura 17 - Evolução da deterioração do pavimento asfáltico



Fonte: Wirtgen (2012)

Segundo Bernucci et al. (2008) e Wirtgen (2012), os erros de dimensionamento dos projetos de pavimentação levam a estrutura do pavimento ao processo de degradação, antes mesmo do cumprimento de sua vida útil. Falhas em projeto, como espessura inadequada das camadas e compactação deficiente podem danificar o pavimento em pouco tempo. Na figura 18 é apresentada a principal diferença entre as deteriorações superficial e estrutural do pavimento.

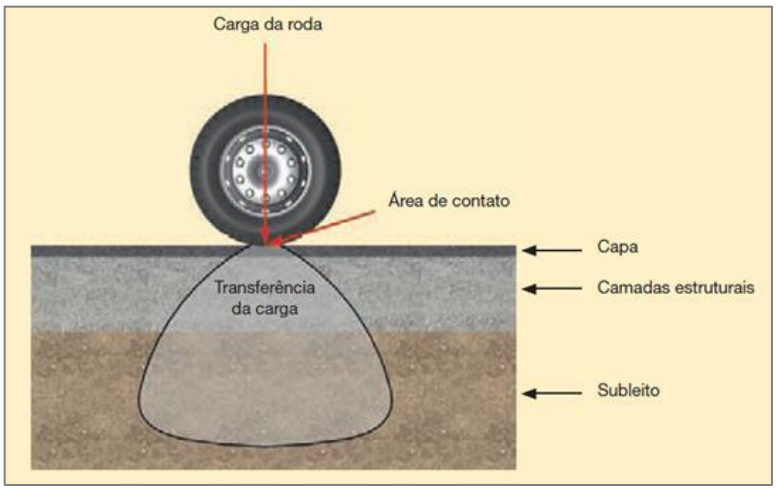
Figura 18 - Deterioração: superficial e estrutural em pavimentação asfáltica



Fonte: Wirtgen (2012)

O pavimento flexível é constituído por revestimento asfáltico aplicado sobre as camadas de base granular. As camadas sobrepostas formam a estrutura do pavimento, cuja função é receber e transmitir à fundação, os esforços oriundos das solicitações do tráfego. As camadas inferiores do pavimento devem estar bem consolidadas, para que a dissipação de tensões ocorra igualmente sobre as camadas, figura 19, impedindo as deformações na estrutura por recalques diferenciais (BALBO, 2007).

Figura 19 - Bulbo de tensões projetado sobre as camadas do pavimento



Fonte: Wirtgen (2012)

Os efeitos das cargas dinâmicas das rodas dos veículos, somados às dosagens inadequadas das misturas; aos efeitos das ações climáticas; a falta de qualidade dos materiais utilizados nas composições das misturas; ao envelhecimento do ligante asfáltico; a falta de manutenção; as falhas nos projetos e aos erros do processo executivo são os principais fatores responsáveis pelas deformações nos pavimentos (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com Balbo (2007), a camada asfáltica deve ser composta por misturas bem homogeneizadas, de maneira que ao receber as cargas não sofra grandes deformações elásticas ou desagregação de materiais.

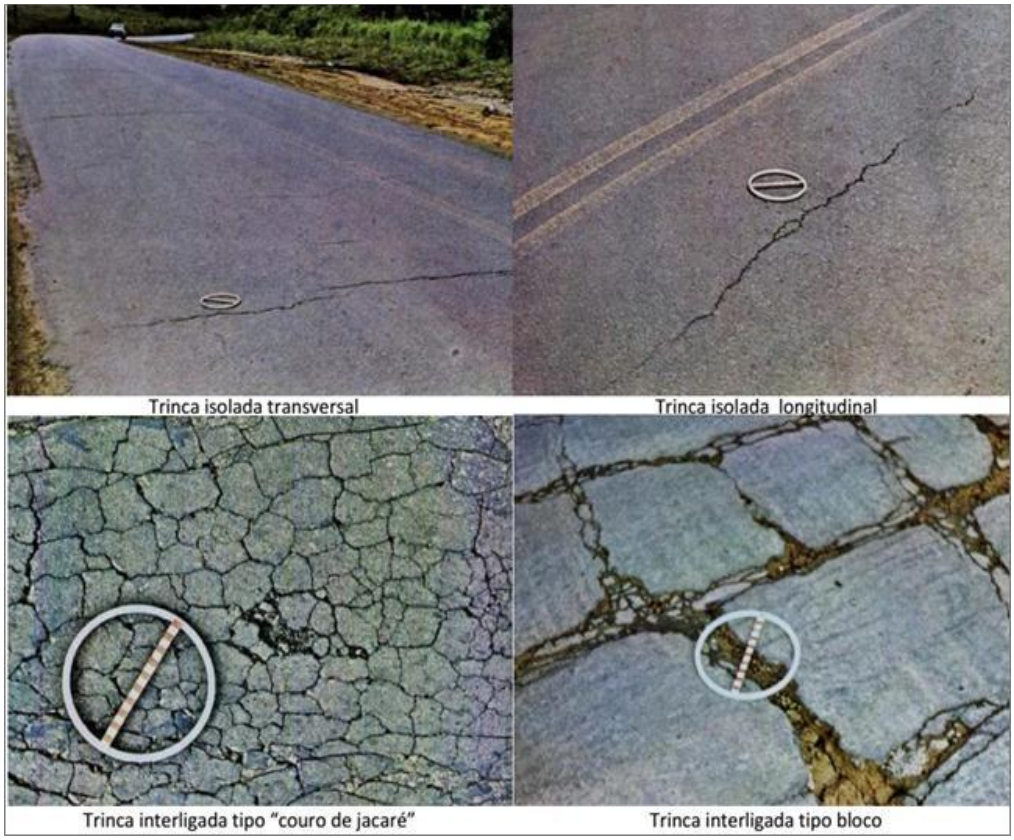
Segundo Silva (2008), as patologias mais comuns em camadas superficiais de pavimentos asfálticos são o fendilhamento por fadiga (fissuras e trincas), as ondulações, os afundamentos plásticos e os buracos ou panelas.

Os termos técnicos relativos aos diversos tipos de desgastes que ocorrem em pavimentos flexíveis são classificados e definidos, conforme a terminologia da norma DNIT 005/2003-TER. Nos subitens a seguir estão descritos os tipos de degradações mais comuns em pavimentos asfálticos.

2.8.1 Desgastes por fendilhamento

As fendas são descontinuidades que aparecem na superfície do pavimento e são classificadas como fissuras e trincas, segundo a sua forma e dimensão da abertura. A norma DNIT 005/2003-TER define as fissuras, em pavimentos asfálticos, como patologias incipientes que, inicialmente, não causam problemas funcionais a estrutura do pavimento. Elas possuem largura capilar e podem aparecer tanto nos eixos longitudinal e transversal, como obliquamente ao eixo da via. As trincas são fendas com abertura superior à abertura da fissura, elas aparecem na superfície do pavimento sob a forma de trinca isolada ou interligada, figura 20.

Figura 20 - Tipos de fendas em pavimento asfáltico



Fonte: Imagem adaptada da norma DNIT 005/2003-TER

Assim como as fissuras, as trincas isoladas também aparecem nos eixos longitudinal e transversal da via. Os fenômenos de retração térmica ou do material do revestimento ou da base são fatores que contribuem para o surgimento de trincas isoladas. A trinca interligada, conhecida como “Couro de Jacaré”, pode ser definida como um conjunto de trincas ramificadas em múltiplas direções. As trincas tipo “Bloco” são conjuntos de trincas interligadas, caracterizadas pela configuração de blocos bem definidos. As trincas interligadas podem apresentar erosões nas bordas, o que potencializa a deterioração da camada de revestimento (DNIT 005/2003-TER).

O processo de formação de cavidades no pavimento é, geralmente, iniciado a partir de trincas generalizadas. Esse processo, em grau elevado de desgaste, passa a atingir as camadas inferiores da estrutura do pavimento.

2.8.2 Desgastes por afundamentos

O afundamento do revestimento asfáltico, ilustrado na figura 21, subdivide-se em afundamento plástico figura 21 (a) ou de consolidação, figura 21 (b). Esse tipo de defeito é caracterizado como uma deformação permanente. O afundamento plástico é causado pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento, acompanhado de solevamento. O afundamento de consolidação é causado pela consolidação diferencial de uma ou mais camadas do pavimento (DNIT 005/2003-TER).

Figura 21 - Afundamentos típicos em pavimento asfáltico

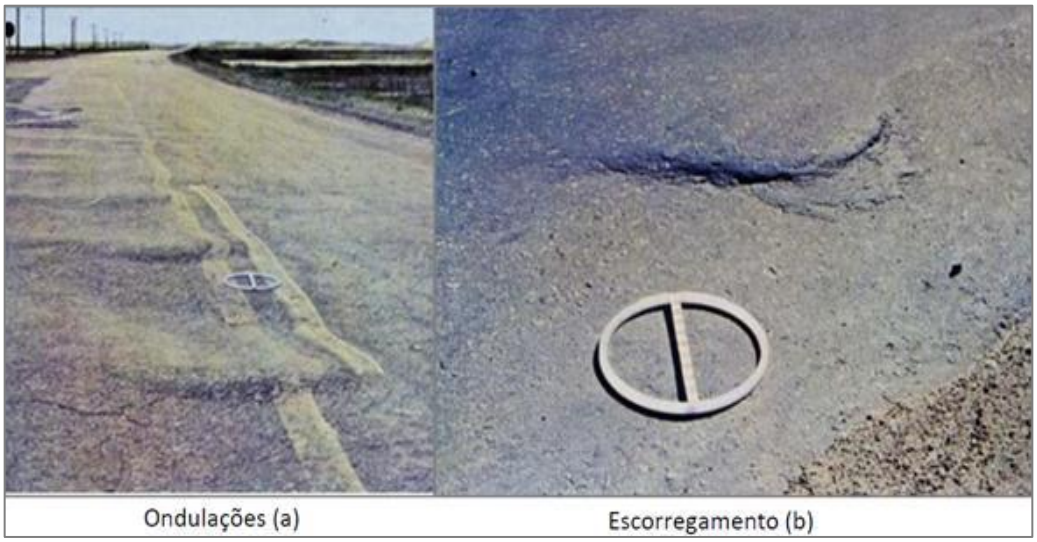
Fonte: DNIT 005/2003-TER

Segundo Bernucci et al. (2008); Silva (2008), os afundamentos dificultam o processo de drenagem natural das águas pluviais e contribui para a ocorrência de acidentes, além de acelerar o processo de degradação do pavimento.

2.8.3 Desgastes por ondulações e escorregamentos

A norma DNIT 005/2003-TER define as ondulações, figura 22 (a), ou escorregamentos, figura 22 (b), como deformações plásticas que surgem no eixo transversal da via.

Figura 22 - Ondulações e escorregamentos na pista de rolamento



Fonte: DNIT 005/2003-TER

De acordo com a norma do DNIT 005/2003-TER, o escorregamento, figura 23 (b), é caracterizado pelo deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, com aparecimento de fendas em forma de meia-lua.

2.8.4 Efeitos da exsudação do CAP

O efeito da exsudação sobre a superfície do pavimento é caracterizado pelo excesso de ligante betuminoso, causado pela migração do asfalto através do revestimento (DNIT 005/2003-TER).

Segundo Lima (2003), os fatores que contribuem para ocorrência de exsudação do CAP, figura 23, são a variação de temperatura; a oxidação do ligante; os longos períodos de chuvas e o aumento não previsto de volume de tráfego de veículos para o trecho.

Figura 23 - Efeitos da exsudação do CAP

Fonte: DNIT 005/2003-TER

Segundo Padula (2002) além de causar deformações permanentes devido ao excesso de betume, a exsudação do ligante reduz o atrito entre o pneu e a camada de rolamento e ainda pode contribuir para a ocorrência de acidentes.

2.8.5 Desgaste por perda de material

O efeito do arrancamento progressivo dos agregados do pavimento, devido à aspereza superficial do revestimento, provocada por esforços tangenciais causados pelo tráfego, define o desgaste por perda de material, figura 24. Esse tipo de defeito é caracterizado, segundo a norma DNIT 005/2003-TER, por um tipo de erosão que ocorre por ação de cargas cíclicas.

Figura 24 - Desgaste por perda de materiais

Fonte: DNIT 005/2003-TER

2.8.6 Formação de cavidades no pavimento

As cavidades na superfície dos pavimentos são os defeitos que mais causam insegurança e desconforto aos motoristas. O processo de erosão nesse tipo de desgate é acelerado no periodo de chuvas, o que potencializa a degradação do pavimento (PADULA, 2002).

As cavidades no pavimento, conhecidas como buracos ou panelas, figura 25, são formadas por diversas causas, sendo que a falta de aderência entre as camadas superpostas é apontada como uma das principais causas de formação de cavidades em pavimentos. A falta de aderência provoca o desplacamento das camadas do revestimento asfáltico, podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação de parte da estrutura (DNIT 005/2003-TER).

Figura 25 - Panelas ou buracos

Fonte: Google (2017)

Há ainda outros tipos de defeitos decorrentes de diversos tipos de intervenções nas vias. Dentre eles destacam-se os remendos executados de forma precária, figura 26, por empresas não qualificadas e ou pelas concessionárias de água, gás e energia.

Figura 26 - Remendos no pavimento asfáltico

Fonte: Google (2017)

Em algumas cidades, a situação de precariedade das estradas pode ser mudada com a implantação de programas de manutenção corretiva e preventiva, realizando-

se reparos com revestimento asfáltico reciclado e aplicado a frio, aproveitando todas as vantagens que essa forma de manutenção de pavimentos oferece às obras de engenharia rodoviária.

2.9 Manutenção e reabilitação de pavimentos flexíveis

Os remendos em pavimentos asfálticos é uma forma de recuperação do revestimento com preenchimento de uma ou mais camadas do pavimento, em operação denominada de “tapa-buraco”. De acordo com a norma do DNIT 005/2003-TER, existem dois tipos de remendos, o remendo profundo, que é executado na forma retangular, com preenchimento de uma ou mais camadas do pavimento e o remendo superficial, considerado apenas um reparo localizado na superfície do revestimento.

Para Padula (2002), as especificações elaboradas para realização dos serviços de manutenção em rodovias deveriam fornecer algum tipo de incentivo para que a melhoria da qualidade do produto e dos serviços prestados seja contínua.

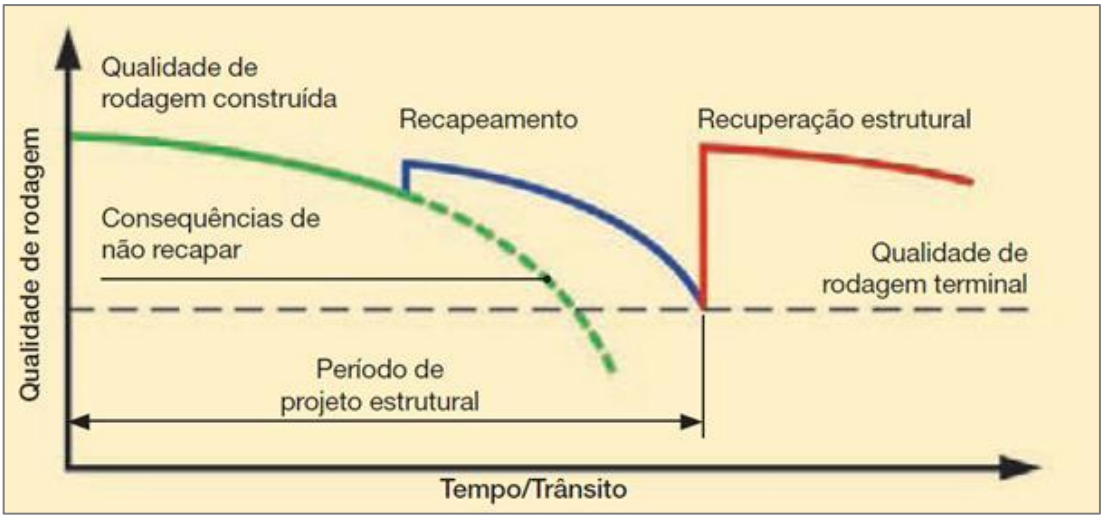
Chamberlin (1995) apud Padula (2002) sugerem a criação de um modelo para classificação das variáveis envolvidas em projetos de construção e manutenção de pavimentos. Os critérios estabelecidos no modelo proposto pelos autores orientam o entendimento de como ocorre o processo de deterioração do pavimento. Segundo Padula (2002), a utilização desse modelo viabiliza a elaboração do diagnóstico do trecho avaliado além de fornecer orientações sobre o reparo indicado para o problema identificado. O modelo ainda tem como objetivos avaliar a melhoria de qualidade das viagens, o controle dos processos construtivos e identificar as consequências de defeitos estruturais ou superficiais do pavimento. Para além das avaliações estruturais e funcionais do pavimento, Padula (2002) enfatiza a importância de se conhecer as opiniões dos usuários das vias quanto à qualidade e o conforto durante a realização de suas viagens.

De acordo com Padula (2002), o índice de irregularidade longitudinal que ocorre no início de operação da via pode contribuir de forma negativa em processos de manutenção, reduzindo-se a qualidade da trafegabilidade do trecho. O autor ainda

relata que as propriedades físicas dos materiais envolvidos no projeto e a forma de execução influenciam no comportamento estrutural do pavimento.

Conforme Wirtgen (2012), a qualidade das camadas do pavimento deve ser monitorada continuamente para evitar o avanço da degradação da estrutura. Os sistemas de gerenciamento da qualidade de rodagem dos pavimentos são ferramentas importantes na tomada de decisões para planejamento de operações de manutenção e recuperação das estradas. A taxa de deterioração do pavimento é definida pela qualidade de rodagem, conforme representado no gráfico da figura 27.

Figura 27 - Gerenciamento da qualidade de rodagem do pavimento



Fonte: Wirtgen (2012)

Os estudos das avaliações funcional e estrutural da via fornecem os dados para subsidiar as possíveis soluções de projeto para a reabilitação do pavimento. Nessas avaliações as severidades dos defeitos superficiais e estruturais são descritas de forma detalhada. Portanto, conforme relatado por Magalhães (SUDECAP, 2016), deve-se realizar o diagnóstico dos problemas visualizados na camada de rolamento, para que possam ser adotadas as alternativas adequadas de recuperação do pavimento.

2.9.1 Reparos na superfície do pavimento

“A recuperação de pavimentos é o termo utilizado para descrever o trabalho necessário para restaurar uma estrada deteriorada e recuperar a integridade estrutural do pavimento” (WIRTGEN, 2012).

Para Silva (2008) e Bernucci et al. (2008), a compactação da camada asfáltica é uma das etapas de construção que ocorrem mais erros e, por isso, sua execução deve ser acompanhada por um técnico capacitado.

No caso de aplicação de mistura asfáltica quente, no acionamento incorreto do sistema vibratório do cilindro de compactação entre as juntas das faixas quente e fria ocorrem a quebra de agregados e as ondulações na pista. A linha de descontinuidade formada pelas juntas são pontos preferenciais de segregação de materiais, figura 28, com futuros problemas de abatimentos e ou início de fendilhamento (WIRTGEN, 2012).

Figura 28 - Compactação deficiente

Fonte: Adaptado de Google (2017)

De acordo com Silva (2008) e Bernucci et al. (2008), um erro comum em recuperação de pavimentos flexíveis é o lançamento da nova mistura asfáltica sobre a camada de revestimento asfáltico existente, sem realizar a fresagem do pavimento. Segundo os autores, os defeitos existentes na superfície do pavimento, como fendilhamento, ondulações e cavidades podem se propagar para a nova camada de asfalto, cuja vida útil acaba sendo encurtada.

Segundo Bernucci et al. (2008), outro problema comum durante o lançamento e compactação do revestimento asfáltico é a falta de observação quanto ao nível de instalação dos elementos de drenagem. No projeto de manutenção de uma via asfaltada deve haver a compatibilização entre o projeto da estrada e as obras de drenagem.

Os desníveis entre os elementos de drenagem e a pista de rolamento devem ser observados durante a elaboração dos projetos de manutenção das vias. Os degraus entre os poços de visitas localizados, muitas vezes, nos centros das pistas, figura 29, podem causar danos e instabilidade aos veículos, bem como acidentes com vítimas fatais.

Figura 29 - Degraus entre a pista e os elementos de drenagem

Fonte: Adaptado de Google (2017)

As ocorrências de vazamentos em tubulações enterradas podem gerar grandes cavidades no subsolo e comprometer toda a estrutura do pavimento, inclusive o revestimento, causando grandes prejuízos a toda população, Bernucci et al. (2008); Silva (2008). Quando os reparos são executados sem instruções técnicas, os defeitos não são efetivamente reparados e podem surgir novos desgastes de maiores proporções. Os remendos realizados pelas concessionárias de energia, água e gás, geralmente, causam algum tipo de defeito na via. A figura 30 ilustra alguns remendos executados fora das especificações técnicas.

Figura 30 - Remendos executados sem critérios técnicos

Fonte: Adaptado de Google (2017)

De acordo com Wirtgen (2012), o planejamento técnico das atividades de reabilitação de pavimentos é fundamental para que o resultado da obra de recuperação rodoviária apresente a segurança e a qualidade esperadas. Os estudos de viabilidade técnica e econômica realizados durante o planejamento da obra de recuperação evitam retrabalho e prejuízos financeiros.

Clifton (2012) recomenda a seguinte sequência de etapas, para realização de reparos em cavidades na superfície de pavimentos asfálticos, figura 31.

Figura 31 - Sequência construtiva para reparos em pavimentos

Fonte: Adaptado de Clifton (2012)

2.9.2 Reparos com aplicação de mistura asfáltica fria

Nos Estados Unidos e em alguns países da Europa, a aplicação de asfalto frio é bastante comum, tanto na construção de pavimentos novos, quanto na manutenção de rodovias e vias urbanas. Segundo Wirtgen (2012), o asfalto frio tem sido indicado

em obras de manutenção de vias urbanas, pela rapidez na liberação do tráfego e por minimizar os prazos e custos das obras.

No Brasil, a opção pelo uso de asfalto frio ainda é pouco adotada pelos projetistas, apesar de ser uma solução prática e eficiente no reparo de cavidades, trincas e demais imperfeições no revestimento das vias. Segundo a Minasfalto (2017), o asfalto frio possui, em sua composição, ligantes modificados com aditivos retardadores de cura, esse tipo de aditivo permite a estocagem da mistura por um período de até 12 meses. O asfalto frio pode ser aplicado sob quaisquer condições climáticas.

Dentre as vantagens da aplicação do asfalto frio destacam-se:

- Maior praticidade, o asfalto frio vem ensacado e pronto para o uso, sem a necessidade de adicionar produto algum à mistura.
- Não há necessidade de conhecimento técnico ou grandes equipamentos para aplicação do produto, em operações “tapa-buraco” o processo pode ser realizado de forma simples e prática.
- Facilidade no transporte e na estocagem por ser ensacado.
- Impermeabilidade da mistura, devido à presença de hidro-repelentes em sua composição, impedindo a percolação de água através dos possíveis vazios porventura presentes na mistura.
- Boa aderência ao pavimento existente.
- Rapidez com liberação imediata do tráfego, após a aplicação do produto, sem alterar as condições de resistência e qualidade do produto.

O asfalto frio tem sido comercializado ensacado, em embalagens de 25 kg, conforme ilustrado na figura 32. Seu uso tem sido indicado em obras de manutenção de vias urbanas. O concreto asfáltico aplicado a frio é uma mistura asfáltica tipo CBUQ.

Figura 32 - Forma de comercialização do asfalto frio

Fonte: Adaptado de Google (2017)

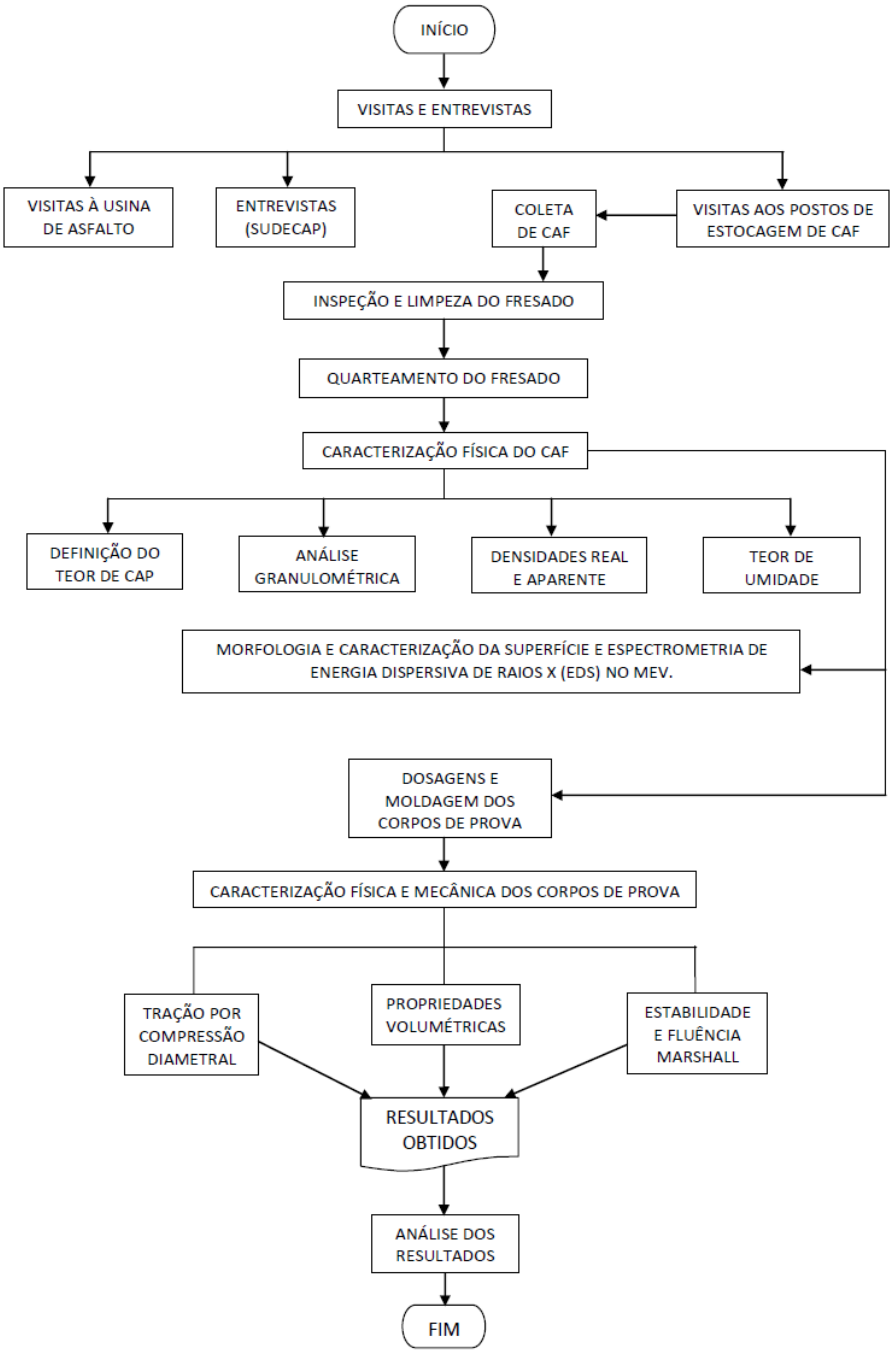
Segundo informações sobre o produto, disponibilizadas pelo fabricante Minasfalto (2017), a aplicação da mistura asfáltica fria deve ser feita, seguindo-se as recomendações de uso do produto nas embalagens.

- Preparar a superfície, retirando todos os detritos presentes na cava.
- Caso haja presença de água na cava, não é necessário esgotar a água para lançamento do produto.
- Despejar o conteúdo e destorroar bem, com auxílio de uma pá.
- Espalhar o produto por toda extensão do furo, preenchendo todo o espaço delimitado.
- Compactar com soquete e ou com compactador mecânico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa experimental foi realizada, conforme a sequência de etapas ilustradas no fluxograma da figura 33.

Figura 33 - Fluxograma das etapas da pesquisa experimental



Fonte: Autora (2017)

Todos os ensaios de caracterização dos materiais, bem como as dosagens das misturas asfálticas foram realizados nos laboratórios de Pavimentação e Engenharia de Materiais do CEFET-MG, *Campus* I.

3.1 Materiais

Nas composições das misturas asfálticas foram utilizados os seguintes materiais.

- Cimento Asfáltico Fresado (CAF).
- Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).
- *Re-refined Engine Oil Bottom* (REOB).
- Cal.
- Pó de borracha.

As dosagens das misturas asfálticas desenvolvidas foram divididas em três grupos (G1, G2 e G3), para facilitar o entendimento do comportamento das misturas compactadas, na medida em que foram sendo inseridas e ou retiradas às frações dos materiais componentes de cada mistura (tabela 1).

Tabela 1 - Dosagens pesquisadas

Grupo	Mistura	% CAF (*)	% Cal (*)	% Pó de Borracha (**)	% REOB (**)	% CAP virgem (*)
G1	MR	100	1	10	10	0
	M1	100	1	20	10	0,6
	M2	100	1	15	15	1,1
G2	MR	100	-	10	10	0
	M1	100	-	20	10	0,6
	M2	100	-	15	15	1,1
G3	MR	100	-	-	20	0
	M1	100	-	-	20	0,6
	M2	100	-	-	20	1,1

(*) Porcentagem em relação ao peso do CP 1200 g.

(**) Porcentagem em relação ao peso de CAP.

Fonte: Autora (2018)

Todas as misturas ensaiadas utilizaram 100% de CAF em suas composições, com adições de cal, pó de borracha, REOB e ligante virgem em porcentagens variadas. O objetivo foi avaliar a influência de cada material no comportamento mecânico de misturas recicladas com 100% de fresado.

3.1.1 Concreto Asfáltico Fresado (CAF)

O CAF é um resíduo sólido tipo RCC (Resíduo de Construção Civil), que pertence à classe II-B, conforme NBR 10.004/2004. O resíduo de CAF é composto por agregados graúdos (britas); agregados miúdos (areia e pó de pedra) e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) oxidado (figura 34). Os agregados presentes no CAF apresentam-se em tamanhos graúdos e miúdos envolvidos por películas de CAP oxidado. Cada material, parte da composição da mistura asfáltica, depois de compactado, deve apresentar propriedades que garantam durabilidade e resistência aos esforços que serão solicitados ao pavimento.

Figura 34 - Concreto Asfáltico Fresado (CAF)

Fonte: Autora (2018)

O agregado graúdo é definido pelo material que fica retido na peneira de 4,8 mm (nº 4), já o agregado miúdo é considerado o material que passa pela peneira de 4,8 mm (nº 4) e fica retido na peneira de 0,075 mm (nº 200), constituindo-se areia e pó de pedra ou uma mistura de ambos (PSP IE-07/2010, p. 03).

O resíduo (CAF), utilizado na pesquisa, foi cedido pelo engenheiro Tomas Arantes, responsável pela Regional Oeste (SUDECAP), localizada no bairro Betânia em Belo Horizonte/MG. Segundo Arantes, o CAF cedido originou-se do processo de fresagem de trechos recapeados das vias urbanas da capital. Numa inspeção visual do material, *in situ*, observou-se a presença de argila vermelha e matéria orgânica

(folhas secas), o que implicou em realizar uma limpeza do material antes de utilizá-lo nas misturas.

A etapa de limpeza do material poderia ter sido eliminada e a sua contaminação, por argila vermelha, poderia ter sido evitada, caso o fresado tivesse sido estocado seguindo-se os critérios de gestão, para esse tipo de resíduo (ZAUMANIS; MALLICK, 2014). Quando o processo de fresagem é mais profundo, o material pode ser contaminado com solos (argilas e siltes) presentes na camada de base, por isso deve-se dar atenção à gestão adequada do CAF.

3.1.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP (figura 35) é o componente de mais alto custo em misturas asfálticas. A adição de ligante virgem às misturas visa melhorar a homogeneização dos materiais envolvidos nas dosagens. As características do ligante virgem (CAP 50/70), utilizado na pesquisa, estão descritas na tabela 2.

Figura 35 - Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70)

Fonte: Autora (2018)

Tabela 2 - Ficha técnica do CAP 50/70

Caracterísicas	Unidades	Limites	Métodos		
		CAP 50/70	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1 mm	50 - 70	NBR 6576	D 5	ME 003/99
	°C	46	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol	s		NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135°C, mín.		141			
a 150°C, mín.		50			
a 177°C		30 - 150			
Viscosidade Brookfield	cP		NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín.		274			
a 150°C, SP 21, mín.		112			
a 177°C, SP 21		57 - 285			
Índice de suscetibilidade térmica (1)		(1.5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor mín.	°C	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	60	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 mín.				D 2872	
Variação em massa, máx. (2)	% massa	0,5			
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	20	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín (3)	%	55	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: Tabela adaptada de DNIT 095/2006

Os percentuais de ligante virgem (CAP 50/70) de 0,6% e 1,1% foram adicionados às misturas ensaiadas, considerando-se o teor de betume oxidado presente no CAF.

3.1.3 *Re-refined Engine Oil Bottom* (REOB)

O REOB foi utilizado, nas misturas, com o objetivo de recuperar as propriedades do CAP oxidado presente no fresado e manter a boa trabalhabilidade da mistura em temperatura ambiente. Permanecendo-se moldável no processo de aplicação a frio, por meio de energia de compactação. O óleo lubrificante de motor rerrefinado (OBR400) (figura 36) utilizado na pesquisa foi cedido pela LWART Lubrificantes e possui as características descritas na tabela 3.

Tabela 3 - Ficha técnica do REOB

Parâmetro	Método	Especificação	Valor Típico
Aparência	Visual	-	Liq. Viscoso escuro
Teor de água (%)	Destilação	Ausente	Ausente
Visc. Dinâmica a 50°C (cP)	Brookfield	-	26900
Visc. Dinâmica a 60°C (cP)		-	13550
Visc. Dinâmica a 100°C (cP)		-	1890
Densidade (g/cm³)	ASTM D1298	0,960 - 1,0	0,998
Grau API		10 - 16	10,3

Fonte: Autora (2018)

Figura 36 - *Re-refined Engine Oil Bottom* (REOB)

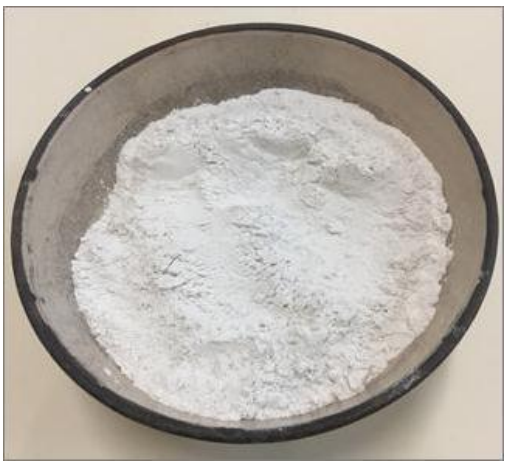
Fonte: Autora (2018)

A viscosidade a 60°C do REOB utilizado nas pesquisas de Buncher (2014) apresentou cP máximo de 5000.

3.1.4 Cal hidratada

A cal utilizada nas misturas (figura 37) foi fornecida pelo setor de obras do CEFET/MG, *Campus* I.

Figura 37 - Cal hidratada



Fonte: Autora (2018)

A cal tem como objetivo melhorar a adesividade entre os componentes da mistura, reduzir a oxidação do betume, além de enrijecer mais o mastique do que os demais fíleres minerais. As características da cal utilizada na pesquisa estão relacionadas na tabela 4.

Tabela 4 - Ficha técnica da cal

Parâmetro analítico	Valor obtido
$Ca(OH)_2$	> 80 %
Teor de água (%)	< 1,0 %
SiO_2	0,1 %
Fe_2O_3	0,1 %
CO_2	1,8 %
Al_2O_3	0,1 %
Densidade (g/cm^3)	0,6

Fonte: Autora (2018)

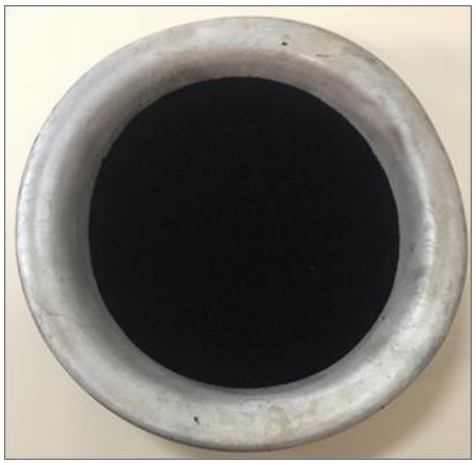
A cal ainda possui impacto positivo na durabilidade das misturas asfálticas, por retardar o fraturamento da camada de rolamento.

3.1.5 Pó de borracha

A porcentagem e a forma de adição de pó de borracha em misturas asfálticas variam em função de cada projeto. Neste trabalho, a adição de pó de borracha foi condicionada à porcentagem de REOB, agente de reciclagem, que compôs as

dosagens das misturas. O pó de borracha, figura 38, foi fornecido pela NTA Asfaltos, procedente da CBL Comércio Reciclagem de Borrachas de Betim, Minas Gerais.

Figura 38 - Pó de borracha de pneu



Fonte: Autora (2018)

De acordo com o ensaio de peneiramento realizado para o pó de borracha, a granulometria do material apresentou variabilidade de tamanhos entre 0,60 mm e 0,149 mm. O pó de borracha contribui para melhorar a homogeneização das misturas, além de impermeabilizar as massas asfálticas compactadas, com o fechamento dos poros. Suas propriedades elásticas também contribuem para o aumento da resistência à tração do pavimento.

3.2 Métodos

As propriedades do CAF tornaram-se conhecidas por meio dos ensaios de caracterização físico-mecânica. Os resultados dos ensaios foram comparados com Misturas de Referência (MR), compostas por 100% de CAF, com adições de cal, pó de borracha e REOB, sem adição de ligante virgem. A metodologia para elaboração deste trabalho seguiu as seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica atual desenvolvida sobre o tema reciclagem asfáltica a quente.
- Realização de entrevistas com os responsáveis pelos serviços de manutenção das vias urbanas de Belo Horizonte.

- Visitas técnicas a usina de asfalto da empresa Etros Engenharia Ltda.
- Visitas técnicas às regionais da SUDECAP, para avaliação da estocagem e coleta do material fresado.
- Caracterização do fresado.
- Moldagem dos Corpos de Prova (CP).
- Realização dos ensaios físicos e mecânicos dos corpos de prova.
- Análise de resultados experimentais.

Após as caracterizações dos materiais e das misturas, os corpos de prova (CP) foram moldados utilizando-se a metodologia Marshall. Com os CP moldados foram realizadas as caracterizações física e mecânica, que compreendeu a execução dos ensaios de absorção de água; determinação das propriedades volumétricas dos CP; estabilidade e fluência Marshall e resistência à tração por compressão diametral.

A caracterização física dos materiais e os ensaios mecânicos foram realizados conforme os procedimentos e métodos descritos nas normas específicas, para projetos de pavimentação asfáltica. O processo de seleção do resíduo consistiu em abordagens macroscópica e microscópica.

3.2.1 Coleta e amostragem dos materiais

Após passar por inspeção visual, o material foi coletado do depósito da regional Oeste em Belo Horizonte/MG, conforme as recomendações da norma DNER PRO 120/97 - Coleta de amostras de agregados - Procedimento e ABNT NBR NM 26/2001 - Agregados - Amostragem. As amostras de CAF foram retiradas desde a crista até a base da pilha. Ao seguir a norma para coleta de agregados, as características do material são mantidas de forma a tornar o lote de amostragem representativo e mais homogêneo.

A técnica de quarteamento manual aplicada seguiu os procedimentos descritos na norma DNER PRO 199/96 - Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório - Procedimento. O resíduo coletado passou pelo quarteamento manual método “B”, para obtenção das amostras.

Antes de realizar o quarteamento das amostras, fez-se uma limpeza no material coletado, para retirada de material orgânico (folhas secas). As amostras selecionadas, a partir do quarteamento, foram utilizadas em ensaios de análises de propriedades físicas do CAF. A seleção do resíduo é fundamental para obtenção da qualidade e desempenho das misturas.

3.2.2 Ensaio de extração de betume das amostras de CAF

Os ensaios para verificação do teor de betume presente nas amostras de CAF foram realizados utilizando-se o equipamento Rotarex (extrator centrífugo de betume), marca Pavitest, modelo I2009B, ilustrado na figura 39.

Figura 39 - Equipamento Rotarex (extrator de betume)

Fonte: Autora (2018)

No processo de extração de betume ocorre a separação do agregado mineral e do cimento asfáltico de petróleo envolto nas amostras do resíduo, permitindo quantificar a quantidade de CAP oxidado presente no fresado. Após a separação, o agregado mineral foi posto em bandejas para início do processo de secagem natural. Os equipamentos e materiais necessários à realização dos ensaios foram:

- Aparelho extrator de betume (figura 39) com prato cuja capacidade é de cerca de 1500 g.
- Balança marca Marte, modelo AD3300, com capacidade de 3310 g e precisão de 0,1 g.
- Bécher com capacidade de 600 ml.
- Espátula ou colher para homogeneização da mistura (CAF e solvente).
- Papel filtro para cobrimento do prato do extrator.
- Solvente (percloroetileno).

A extração de betume atendeu aos requisitos da norma DNER ME 53/94 - Misturas betuminosas - percentagem de betume - Método de ensaio. Foram realizados quatro ensaios para extração do ligante presente no CAF, o roteiro dos ensaios teve a seguinte sequência:

- As amostras selecionadas, no quarteamento, continham 1000 g de CAF e foram classificadas como AM1, AM2, AM3 e AM4.
- As amostras foram pesadas e dispostas em bandejas metálicas para realização do processo de secagem em estufa a 100°C ± 5°C, por uma hora. Após a secagem, foi feito o desmonte dos grumos com a utilização de uma colher.
- As amostras foram colocadas no cantil do extrator, uma por vez. Nesta etapa, cerca de 500 ml de solvente percloroetileno (não inflamável) foi adicionado sobre a amostra até o cobrimento total do CAF.
- A mistura de fresado e reagente foi deixada em descanso por cerca de uma hora, para otimização dos resultados de extração.
- Decorrido o tempo de descanso da mistura, o filtro de papel foi colocado sobre a mistura e as tampas do aparelho foram fixadas para início do ensaio. Depois que a máquina entra em operação, a duração do ensaio é de aproximadamente 3 minutos.
- Após o ensaio, o material foi retirado do equipamento e acondicionado em uma bandeja para secagem ao tempo por 24 horas.
- Decorrido o processo de secagem, o material foi pesado e anotado a sua massa.

A figura 40 ilustra as etapas do ensaio de extração de betume realizado no aparelho Rotarex.

Figura 40 - Etapas de extração de CAP no aparelho Rotarex

Fonte: Autora (2017)

O teor de ligante extraído do CAF foi calculado de acordo com a norma DNER ME 053/94, equação (1):

$$P = \frac{\text{Peso do betume extraído}}{\text{Peso da amostra total}} * 100 \qquad (1)$$

Na reciclagem de CAF tem-se grande interesse em conhecer o percentual de CAP presente no fresado, para dosar de forma adequada os agentes de reciclagem ou a fração de ligante a ser acrescentada às novas misturas. O ensaio de extração de CAP também possibilita avaliar as vantagens econômicas da reciclagem de CAF, por meio do percentual de betume extraído.

Depois de extraído o betume, realizou-se os seguintes ensaios de caracterização do fresado: ensaio de granulometria; determinações de absorção de água pelos agregados graúdos; densidade aparente e densidade real dos agregados graúdo e miúdo.

3.2.3 Ensaios de granulometria do fresado

Os ensaios de granulometria do CAF seguiram os procedimentos da norma NBR NM 248/2003 - Agregados - Determinação da composição granulométrica e ABNT NBR NM 46/2003 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 0,075 mm (nº 200). As peneiras utilizadas no ensaio foram as da série normal indicadas na norma NBR NM 248/2003, conforme tabela 5.

Tabela 5 - Série de peneiras

Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 μm	-
300 μm	-
150 μm	-

Fonte: ABNT NBR NM 248 (2003)

Como visualmente o fresado apresentava variações de materiais finos a grossos, ao conjunto de peneiras da série normal, foram acrescentadas as peneiras de 420 μm (nº 40) 75 μm (nº 200), para quantificar o percentual de material fino presente nas amostras do resíduo. O conhecimento da porcentagem de materiais finos nas amostras de CAF permitiu dosar de forma mais eficiente a quantidade de cal, pó de borracha e REOB às misturas.

O peneiramento dos agregados grossos foi feito com a utilização das peneiras da série normal, com acréscimo das malhas 12,5 mm e 25,0 mm.
As amostras utilizadas nos ensaios de granulometria continham 2000 g de fresado, cada uma. A partir dos resultados dos ensaios de granulometria, foram determinados os módulos de finura das amostras, conforme a NBR NM 248/2003. O cálculo do módulo de finura resume-se à soma das porcentagens retidas acumuladas em massa nas peneiras da série normal, dividido por 100.

Os materiais retidos acumulados em cada uma das peneiras foram pesados em balança, com precisão de 0,1%, conforme determina a norma. O teor de umidade do fresado foi determinado, conforme a norma DNER ME 213/94 - Solos Determinação do teor de umidade. As amostras foram preparadas com porções de 50 g de material, cada uma. Foram realizadas três medidas de teor de umidade para cada material (CAF com e sem betume).

As curvas granulométricas obtidas foram comparadas com os limites inferior e superior da faixa “C” do DNIT 034/2005, indicada para camada de rolamento, conforme ilustrado na tabela 6.

Tabela 6 - Especificações granulométricas para revestimento asfáltico

Peneira de malha quadrada		**% em massa, passante**			
Série ASTM	**Abertura (mm)**	**A**	**B**	**C**	**Tolerância**
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
1/2"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2 (+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação "Binder"	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT 034/2005 - ES

As tabelas, gráficos e comentários sobre os resultados das análises granulométricas estão indicados nos itens de resultados e conclusões.

3.2.4 Densidades real e aparente e absorção de água pelos agregados

A norma NBR NM 53/2003 foi utilizada para determinação das densidades real e aparente e absorção de água pelos agregados graúdos. O método de ensaio da norma DNER ME 084/95 foi utilizado para determinar a densidade real dos agregados miúdos.

A equação (2) foi utilizada para obtenção da densidade aparente dos agregados graúdos (γ_{ag}). A densidade real dos agregados graúdos (γ_{rg}) foi calculada pela aplicação da equação (3) e a propriedade de absorção de água pelos agregados graúdos (A_a) foi determinada pela aplicação da equação (4), todas as equações estão referenciadas na norma NBR NM 53/2003.

$$\gamma_{ag} = \frac{A}{B-C} \qquad (2)$$

Onde:

- γ_{ag} = densidade aparente do agregado graúdo (g/cm³);
- A = massa seca do agregado graúdo (g);
- B = massa saturada do agregado graúdo com superfície seca (g);
- C = massa submersa do agregado graúdo (g).

$$\gamma_{rg} = \frac{A}{A - C} \qquad (3)$$

Onde:

- γ_{rg} = densidade real do agregado graúdo.

$$A_a = \frac{B - A}{A} * 100 \qquad (4)$$

Onde:

- A_a = absorção de água pelo agregado, (%).

A densidade real dos agregados miúdos (γ_{rm}) foi calculada pela equação 5, descrita na norma DNER ME 084/95.

$$\gamma_{rm} = \frac{B - A}{(D-A) - (C-B)} \qquad (5)$$

Onde:

- γ_{rm} = densidade real do agregado miúdo a 25ºC;
- A = massa do picnômetro vazio e seco (g);
- B = massa do picnômetro com a amostra (g);
- C = massa do picnômetro com a amostra e a água (g);
- D = massa do picnômetro cheio d'água (g).

De acordo com os procedimentos descritos na norma DNER 84/1995 foram necessários os seguintes materiais e equipamentos para a realização dos ensaios:

- Picnômetro com capacidade para 500 ml com saída superior e tampa.
- Peneiras de abertura 4,8 mm e 0,075 mm.
- Balança com precisão de 0,01 g;
- Termômetro graduado em 0,5º C, de 0º a 50º C.
- Cápsula de porcelana com capacidade de 500 ml.
- Estufa e fogareiro.
- Água e amostra.

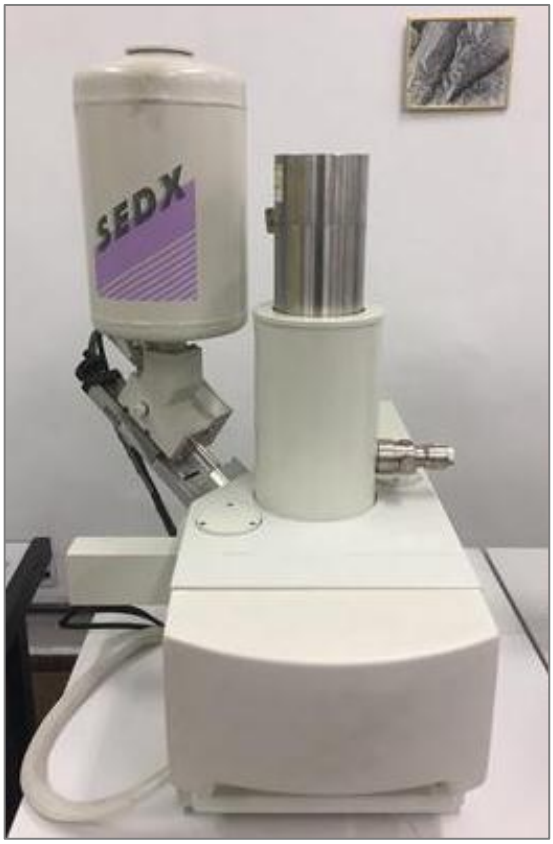
Os ensaios para determinação da densidade real dos agregados miúdos foram adaptados em função da aparelhagem disponível no laboratório. As amostras continham 300 g de material fino, cada uma.

3.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com detector (EDS)

As características microscópicas do fresado foram obtidas por meio da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). A micro caracterização do CAF foi realizada em amostras de agregados graúdos e miúdos. Quatro amostras foram preparadas para realização dos ensaios:

A1 (agregado fino com betume); A2 (agregado fino sem betume); A3 (agregado granular com betume) e A4 (agregado granular sem betume). Os ensaios foram realizados com a utilização do MEV, acoplado com espectrometria de energia dispersiva de raios X, marca Shimadzu, modelo Superscan SSX-550 (figura 41).

Figura 41 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV- Modelo SSX-550)



Fonte: Autora (2017)

As amostras foram, cuidadosamente, selecionadas objetivando a representatividade dos materiais em sua forma natural. Durante a realização dos ensaios todos os cuidados com o manuseio das amostras foram observados, para evitar perdas de partículas e contaminações. O procedimento básico consistiu em:

- Coleta da amostra.
- Posicionamento e fixação da amostra no porta amostra do equipamento *Quick Coater* (figura 42) com auxílio de fita adesiva de carbono.
- Metalização da amostra no equipamento *Quick Coater* (figura 42).
- Após metalização, a amostra foi transportada para o porta amostras do MEV.

- *Setup* do *software*, com ajustes de foco, contraste e ampliação de maneira a se conseguir captar as melhores imagens, nos locais de definição das áreas de interesse nas amostras.

Com o objetivo de se obter imagens mais nítidas, as amostras foram fixadas nos porta amostras e inseridas no equipamento *Quick Coater,* marca Sanyu Electron, modelo SC-701 (figura 42) para metalização com recobrimento da superfície com ouro.

Figura 42 - *Quick coater* – Metalizadora e amostras metalizadas

Fonte: Autora (2017)

No processo de metalização da superfície das amostras utilizou-se a técnica do tipo *Sputtering*, que constitui no bombardeamento de íons positivos, provenientes de uma descarga elétrica em um gás, fazendo com que os átomos e ou as moléculas de ouro sejam desprendidos e depositados sobre o alvo (material a ser revestido).

Com as imagens de morfologia da superfície do CAF, obtidas nos ensaios, foi possível visualizar a interação entre os agregados do fresado e o CAP oxidado e ainda verificar, como os agregados do fresado se organizaram durante a consolidação da mistura.

3.2.6 Moldagem dos corpos de prova

Os Corpos de Prova (CP) foram moldados de acordo com a metodologia Marshall. A amostragem, para avaliação das características mecânicas das misturas, consistiu em moldar 96 corpos de prova com 100% de CAF em todas as dosagens.

As dosagens foram agrupadas em três grupos (G1, G2 e G3) para facilitar a análise dos resultados dos ensaios. As misturas do grupo G1 continham frações de todos os materiais (CAF, cal, pó de borracha, REOB e CAP) utilizados na pesquisa. Com o objetivo de avaliar a influência da cal e do pó de borracha no comportamento físico-mecânico das misturas, foram retiradas as frações de cal das misturas dos grupos G2 e G3 e as frações de pó de borracha do grupo G3. Em atendimento aos requisitos da norma DNER ME 43/95 - Ensaio Marshall, a compactação dos corpos de prova (CP) foi realizada no Soquete Marshall Elétrico CI, Solocap (figura 43).

Figura 43 - Soquete Marshall

Fonte: Autora (2018)

Os seguintes equipamentos foram utilizados na moldagem dos corpos de prova:

- Balança com capacidade de 2000 g marca Marte, modelo AD3300, sensível a 0,01g.
- Espátulas, colheres, panelas e demais ferramentas.
- Termômetro a laser.
- Fogareiro.
- Conjunto de moldes.
- Soquete Marshall Elétrico CI, Solocap (figura 43).
- Extrator de CP.

A moldagem dos CP seguiu o método de ensaio da norma DNER ME 43/95 - Ensaio Marshall, as etapas do ensaio foram organizadas da seguinte forma:

- Pesagem dos materiais (CAF, cal, pó de borracha, REOB e CAP), conforme dosagem.
- Pré-aquecimento do fresado, em forno, à temperatura de 110°C por cerca de 10 minutos, para destorroar o material.
- Aquecimento dos moldes de compactação, em forno, à temperatura de 40°C até a etapa de preenchimento do molde.
- Homogeneização da mistura à temperatura de, no máximo, 170°C em panela com fogareiro.
- Resfriamento da mistura ao ar, até atingir ≤ 40ºC.
- Preenchimento do molde com a mistura fria.
- Fixação do molde no compactador Marshall e aplicação de 75 golpes com soquete Marshall, em ambas as faces do CP.
- Retirada do molde do compactador e posicionamento em local seco e arejado para descanso, por 24 horas.
- Remoção dos CP com a utilização de extrator específico e registro das dimensões.

A figura 44 ilustra a sequência de moldagem dos CP, pela metodologia Marshall.

Figura 44 - Moldagem a frio dos corpos de prova pela metodologia Marshall

Fonte: Autora (2018)

Para cada composição de mistura foram moldados 10 CP, sendo 5 CP para realização dos ensaios de tração por compressão diametral e 5 para ensaios de estabilidade e fluência Marshall. Para todas as misturas compactadas, foram realizados ensaios para determinação das propriedades volumétricas, índice de vazios e absorção de água.

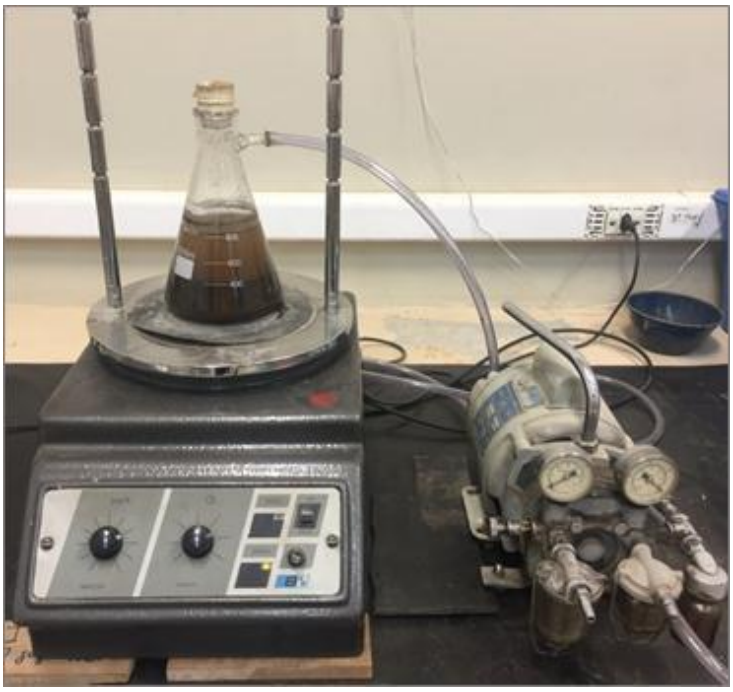
O objetivo dos ensaios foi conhecer a resistência mecânica das misturas e de seus constituintes, os quais interferem diretamente no desempenho estrutural e na qualidade do pavimento. Todos os ensaios realizados seguiram os procedimentos vigentes estabelecidos pelas normas específicas.

3.2.7 Densidade máxima teórica (G_{mm})

A densidade máxima teórica (G_{mm}) foi obtida, segundo os procedimentos indicados na norma NBR 15619/2016 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Segundo a norma, o valor da densidade máxima teórica (adimensional) é obtido pela razão entre a massa da mistura asfáltica não compactada e a massa da água absorvida pela mistura.

Os valores de densidade máxima teórica (G_{mm}) foram utilizados nos cálculos para obtenção das propriedades volumétricas das misturas asfálticas compactadas. O ensaio (figura 45) foi adaptado em relação aos procedimentos da norma, devido à aparelhagem disponível em laboratório.

Figura 45 - Ensaio de densidade máxima teórica (G_{mm})



Fonte: Autora (2018)

A amostragem dos ensaios foi composta de 3 (três) amostras, uma amostra de cada mistura dos grupos G1, G2 e G3. As amostras foram fracionadas em porções de 600 g, cada uma, devido ao tamanho do frasco Kitasato disponível no laboratório. Para realização dos ensaios foi necessária a utilização dos seguintes aparelhos e materiais:

- Frasco de vidro Kitasato de capacidade para 1000 ml, com tampa e conexão horizontal superior, para fixação de tubulação à bomba de vácuo.
- Balança com capacidade de 2000 g marca Marte, modelo AD3300, sensível a 0,01g.
- Bomba de Vácuo com capacidade de pressão residual de 4 kPa, com manômetro acoplado, válvula para permitir o ajuste do vácuo aplicado no recipiente e saída de alívio para pressão de vácuo.
- Termômetro.
- Agitador mecânico, com controlador de velocidade.
- Bandeja metálica; funil; pipeta.
- Estufa.
- Amostras.
- Água potável.

Os ensaios das misturas asfálticas foram realizados, observando-se a seguinte sequência:

- Resfriamento da mistura à temperatura ambiente.
- Pesagem do frasco kitasato com 1000 ml de água.
- Pesagem de 600 g de mistura asfáltica (amostra).
- Introdução da amostra no frasco kitasato.
- Pesagem do frasco contendo a amostra e a água potável até a graduação de 1000 ml.
- Bloqueio da abertura do frasco com tampa e conexão da saída do frasco à tubulação da bomba de vácuo.
- Posicionamento e fixação do frasco com a amostra e água sobre o agitador mecânico.

- Início da agitação mecânica e aplicação gradual da pressão de vácuo até atingir 3,7 kPa, por um período de 2 minutos.
- Após o período de aplicação da pressão de vácuo de 3,7 kPa, aumentou-se a pressão residual para 4,0 kPa até o final do ensaio, que durou 15 minutos.
- Após os 15 minutos, a pressão de vácuo foi reduzida gradativamente, por meio da válvula de alívio.
- O volume do frasco foi completado com água potável, cuidadosamente, para não introduzir ar na amostra, até a graduação de 1000 ml.
- Pesagem do frasco com a amostra, completo com a água potável.

A densidade máxima teórica das amostras (G_{mm}) é um valor adimensional, obtido pela equação (6):

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \qquad (6)$$

Onde:

- A = massa da amostra seca (g);
- B = massa do recipiente com volume completo com água potável (g);
- C = massa do recipiente contendo a amostra submersa em água (g).

3.2.8 Propriedades volumétricas das misturas asfálticas compactadas

As propriedades volumétricas das misturas asfálticas compactadas a saber, a massa específica aparente (G_{mb}); Volume de Vazios (VV); Volume de Vazios Preenchidos com Betume (VCB); Volume de Vazios do Agregado Mineral (VAM) e Relação Betume Vazios (RBV) foram calculadas, consoante aos procedimentos descritos na norma DNER 117/94. Os valores da densidade máxima teórica (G_{mm}) das misturas não compactadas foram utilizados na obtenção dos parâmetros volumétricos das misturas compactadas. A massa específica aparente do CP (G_{mb}) foi obtida utilizando-se a equação (7).

$$G_{mb} = \frac{M_s}{M_s - M_{ssub}} \qquad (7)$$

Onde:

- M_s = massa seca do CP (g);
- M_{ssub} = massa seca submersa do CP (g).

O Volume de Vazios (VV), parâmetro que caracteriza a porosidade da mistura após sua compactação, foi obtido pela aplicação da equação (8).

$$VV = 100 * \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \qquad (8)$$

Onde:

- G_{mb} = massa específica aparente do CP (g/cm³);
- G_{mm} = densidade máxima teórica da mistura não compactada (adimensional).

O Volume de Vazios Preenchidos com Betume (VCB) caracteriza a homogeneização da mistura e a distribuição do CAP no encapsulamento dos agregados do fresado. Esse parâmetro foi obtido aplicando-se a equação (9).

$$VCB = \frac{\% \text{ CAP}}{\gamma_{CAP}} * G_{mb} \qquad (9)$$

Onde:

- G_{mb} = massa específica aparente do CP (g/cm³);
- γ_{CAP} = peso específico do CAP (1,025 g/cm³);
- % CAP = percentual de CAP na mistura.

O Volume de Vazios do Agregado Mineral (VAM) é um parâmetro que depende da mineralogia do agregado que, no fresado, poderá ter valores diferentes, devido ao primeiro uso do CAF. O fresado, por já ter sido envolvido por camada de CAP, poderá apresentar valores diferentes dos agregados virgens de uma mistura asfáltica convencional. O VAM é obtido a partir do somatório dos valores de Volume de Vazios (VV) e Volume de Vazios Preenchidos com Betume (VCB), conforme indicado na equação (10).

$$VAM = VV + VCB \qquad (10)$$

Relação Betume Vazios (RBV) é calculada a partir dos valores de Volume de Vazios do Agregado Mineral (VAM) e Volume de Vazios (VV) da mistura, aplicando-se a equação (11).

$$RBV = \frac{VAM - VV}{VAM} * 100 \qquad (11)$$

Os índices de vazios e absorção de água das misturas asfálticas compactadas foram obtidos, conforme determina a norma NBR 9778/1987 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Importante propriedade volumétrica, o índice de vazios foi calculado considerando-se a relação entre o volume de poros permeáveis e o seu volume total, conforme equação (12).

$$i_v = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_{satsub}} * 100 \qquad (12)$$

Onde:

- M_{sat} = massa saturada do CP (%);
- M_s = massa seca do CP (g);
- M_{satsub} = massa saturada submersa do CP (g).

A porcentagem de absorção de água pelos corpos de prova é caracterizada pelo aumento da massa da amostra em função do preenchimento de seus vazios com água. O percentual de absorção de água de cada CP foi obtido a partir da equação (13), que expressa o resultado da relação entre a massa saturada e a massa seca.

$$A_a = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \qquad (13)$$

Onde:

- A_a = índice de absorção de água do CP (%);

- M_{sat} = massa saturada do CP (g);
- M_s = massa seca do CP (g).

Os procedimentos para os cálculos do índice de vazios e absorção de água dos corpos de prova seguiu a seguinte sequência, descrita na norma NBR 9778/1987:

- Pesagem dos CP ao ar.
- Pesagem submersa dos CP, em balança hidrostática.
- Imersão das amostras em água à temperatura de (23 ± 2) °C, durante o período de 24 horas.
- Após o período de saturação, os corpos de prova foram retirados da água, secou-se a superfície dos CP com um pano úmido, para realização da pesagem.
- Pesagem dos CP ao ar, após saturação.
- Pesagem submersa dos CP saturados, em balança hidrostática.

Os materiais e equipamentos utilizados na realização dos ensaios para obtenção das propriedades volumétricas dos corpos de prova estão descritos abaixo:

- Balança com capacidade de 2000 g marca Marte, modelo AD3300, sensível a 0,01g.
- Água potável.
- Termômetro.
- Recipiente com água.
- Escorredor para suporte dos CP.
- Toalha para secar a superfície dos CP.

Para não danificar as misturas compactadas, os CP foram mantidos sob saturação por 24 horas e não 72 horas, como indicado na norma. Os CP não foram secos em estufa, mas ao ar. Essa adaptação no procedimento foi necessária, devido à presença do agente rejuvenescedor (REOB) nas composições das misturas.

Numa inspeção visual dos CP, foi possível identificar macro poros por onde a água pode ter infiltrado, durante o processo de saturação. Na compactação mecânica dos corpos de prova moldados a frio, as concentrações de materiais finos e granulares agruparam-se de forma concentrada.

3.2.9 Ensaios mecânicos

Para avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas, foram realizados os seguintes ensaios:

- Estabilidade e fluência Marshall.
- Resistência à tração por compressão diametral.

Os procedimentos dos ensaios seguiram as normas vigentes aplicadas aos projetos e obras de pavimentação.

3.2.10 Estabilidade e fluência Marshall

Segundo a norma DNER 043/1995 - Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall - Método de ensaio, a estabilidade Marshall é definida como a resistência máxima à compressão radial que os CP podem suportar até o seu rompimento e a fluência Marshall é definida pela deformação máxima apresentada pelo CP, desde a aplicação da carga inicial (nula) até a carga máxima, o valor da fluência é obtido simultaneamente ao da estabilidade.

O ensaio de estabilidade e fluência Marshall consiste em aplicar uma força uniaxial (F_v) sobre o CP até o seu rompimento. A estabilidade da mistura compactada é obtida pela carga máxima necessária ao rompimento do CP e a fluência corresponde ao deslocamento máximo sofrido pelo CP, no momento da aplicação da carga máxima. A norma DNER 043/1995 ainda descreve os seguintes equipamentos para realização do ensaio.

- Prensa mecânica, capacidade de carga de 39,2 kN (4000 kgf).
- Bandeja metálica e conjunto de moldes.

- Repartidores de amostras.
- Balança com capacidade de 5000 g, sensível a 0,01g.
- Extrator de corpo de prova.
- Termômetro a laser.
- Banho térmico.
- Medidor de fluência, com graduação de 0,25 mm.
- Paquímetro.
- Pinça de aço ou alumínio para colocar e retirar os CP do banho térmico.

O ensaio seguiu a seguinte sequência de etapas, conforme procedimentos descritos na norma:

- Medição das dimensões dos corpos de prova.
- Pesagem imersa e ao ar dos CP.
- Acomodação do CP no molde de compressão do equipamento.
- Posicionamento do molde de compressão, contendo o CP, na prensa Marshall.
- Anotação da medida inicial do defletômetro.
- Operação da prensa Marshall para início do ensaio, com aplicação da carga, em N (kgf), necessária para produzir o rompimento do CP.

O valor da carga (kgf) obtido na ruptura do CP é anotado como “estabilidade lida”. De acordo com a norma DNER 043/1995, este valor deverá ser corrigido pela espessura do corpo de prova, valor tabelado pela norma ou pela equação 14.

$$f = 927{,}23 * h^{-1{,}64} \qquad (14)$$

Onde:
f = fator;
h = espessura do corpo de prova.

Após aplicação do fator de correção, obtém-se a estabilidade Marshall do CP. Os ensaios de estabilidade e fluência Marshall foram realizados utilizando-se a prensa Marshall, modelo 2HCS, ilustrada na figura 46.

Figura 46 - Prensa Marshall e posicionamento do CP

Fonte: Autora (2018)

Segundo a norma DNIT 034/2005 ES, a mistura asfáltica é aprovada para aplicação em camada de rolamento se possuir estabilidade mínima de 500 kgf, com aplicação de 75 golpes em cada face do CP.

3.2.11 Resistência à Tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram executados, segundo a norma DNIT 136/2010 ME - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio. O equipamento utilizado para execução dos ensaios foi a prensa universal, marca EMIC, linha DL 30.000 (figura 47).

Figura 47 - Prensa universal - posicionamento do CP

Fonte: Autora (2018)

De acordo com a norma DNIT 136/2010 ME, os corpos de prova cilíndricos devem possuir altura entre 3,50 cm e 6,50 cm, com diâmetro de 10 cm e tolerância se ± 0,2 cm. Para realização deste ensaio foi necessária a seguinte aparelhagem, conforme recomendações da norma.

- Prensa mecânica, ilustrada na figura 47.
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 25º C e 60º C.
- Sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura em torno de 25º C.
- Paquímetro.

O ensaio de tração por compressão diametral consiste em aplicar uma força uniaxial (F_v) sobre o CP. A força (F_v) é continuamente aplicada sobre uma fração da área do corpo de prova. Essa força gera tensões de tração ao longo do eixo vertical do diâmetro do CP. O ensaio termina quando o corpo de prova se rompe. As etapas do ensaio consistiram na execução da seguinte sequência.

- Medição das dimensões do corpo de prova (altura e diâmetro).
- Pesagem do CP ao ar e imerso.

- Posicionamento do CP sobre o prato da prensa.
- Aplicação da força "F_v" com deslocamento progressivo a uma velocidade de deformação de 0,8 ± 0,1 mm/s.

O resultado da resistência a tração é obtido com a aplicação da equação (15).

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\ \pi\ øh} \qquad (15)$$

Onde:

- σ_R = Resistência à tração (MPa).
- F = Força aplicada (N).
- ø = Diâmetro do corpo de prova (cm).
- h = Altura do corpo de prova (cm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as respectivas discussões sobre os ensaios de caracterização física do fresado e as caracterizações física e mecânica dos corpos de prova são apresentados nos tópicos a seguir. Para a caracterização física do fresado, realizou-se os seguintes ensaios:

- Determinação do percentual de betume do CAF.
- Análises das curvas granulométricas.
- Determinação das densidades real e aparente dos agregados graúdos e miúdos e absorção de água.
- Análise da morfologia da superfície do fresado por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e caracterização microscópica por detector do tipo EDS.

Os corpos de prova foram submetidos aos seguintes ensaios de caracterizações física e mecânica:

- Propriedades volumétricas dos CP.
- Estabilidade e fluência Marshall.
- Resistência à tração por compressão diametral.

Com os resultados obtidos, foram elaborados gráficos e tabelas para melhor entendimento das propriedades físicas e mecânicas dos materiais e das misturas compactadas.

4.1 Determinação do percentual de betume do CAF

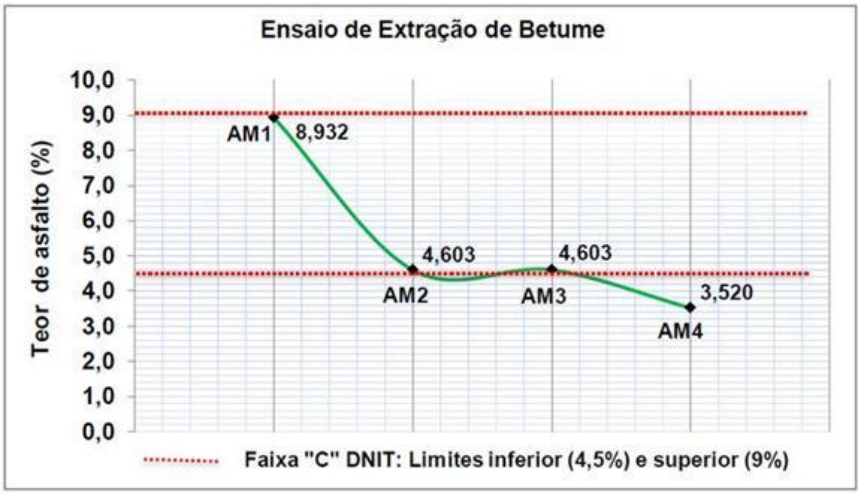
Determinar o percentual de CAP no fresado permite dosar de forma mais otimizada, o teor de ligante virgem a ser utilizado em misturas asfálticas recicladas a quente, bem como definir as características mecânicas da nova mistura. Os resultados dos percentuais de betume presentes nas amostras de CAF estão descritos na tabela 7 e no gráfico da figura 48.

Tabela 7 - Teores de ligante obtidos das amostras de CAF

Ensaio de Extração de Betume						
Amostra	**Peso inicial (g)**	**Peso final (g)**	**Teor de ligante (%)**	**Média**	**Variância**	**Desvio padrão**
AM1	1.000,00	918,00	8,93	5,414	4,321	2,079
AM2	1.000,00	956,00	4,60			
AM3	1.000,00	956,00	4,60			
AM4	1.000,00	966,00	3,52			

Fonte: Autora (2017)

Figura 48 - Resultado dos teores de betume das amostras de CAF



Fonte: Autora (2017)

Na literatura pesquisada foram encontrados os seguintes valores, para os ensaios de extração de betume: Silva (2016) utilizando extrator Rotarex elétrico encontrou o valor de 4,82% de CAP em sua pesquisa. Em seus estudos comparativos, Aguilar (2016) utilizou o reagente tricloroetileno para extração de CAP de três amostras de CAF, de diferentes origens e obteve 5,83% de betume para o material denominado “A”; 7,42% para o material denominado “B” e 6,71% para o material denominado “C”. O valor de 5,9% foi a média do teor de ligante encontrado no fresado pesquisado por Lima (2003). Na pesquisa de Reis (2013), a média do percentual de betume extraído das amostras ficou em 4,02%.

A amostra “AM1” foi a que apresentou o maior teor de ligante. No processo de centrifugação do material ocorre a quebra das concreções formadas pelo asfalto envelhecido, portanto, há uma perda de finos neste processo o que confere a amostra um valor mais alto de extração de CAP.

Segundo Gonçalves et al. (2015) apud Silva (2016), os ensaios realizados no extrator elétrico Rotarex apresentam percentuais de betume mais elevados em função da perda de finos, fato que pode ser confirmado com o resultado obtido para a amostra “AM1”. A eficiência do Rotarex na extração do CAP ocorre pelo fato do aparelho manter a velocidade de rotação constante.

Os teores de CAP encontrados para as amostras “AM1” (8,93%), “AM2” (4,60) e “AM3” (4,60) estão dentro da referência indicada pela norma DNIT 034/2005 ES, que estabelece os percentuais de 4,5% a 9,0% para a faixa “C”. Já o teor de betume para da amostra “AM4” (3,52%) ficou abaixo da faixa “C”. Os resultados dos ensaios com as amostras “AM2” e “AM3” ficaram dentro do percentual esperado.

Embora dois dos resultados tenham ficado fora da linha de coerência para os ensaios de percentuais de betume, optou-se por realizar a média do teor de CAP com os resultados das quatro amostras, obtendo-se o percentual de 5,41%. Apesar das diferenças nos resultados, o percentual médio de CAP presente no fresado está dentro da faixa especificada pela norma DNIT 034/2005 ES, que define teores de betume variando entre 4,5% e 9,0%, para as camadas de rolamento dimensionadas pela faixa “C”.

A determinação do teor de betume do material fresado pode variar em função do grau de envelhecimento do ligante, do teor de material fino presente no fresado, da contaminação com materiais terrosos e do tipo de agregado graúdo utilizado na mistura. Essas variáveis podem ser minimizadas com a aplicação da gestão do resíduo nos processos de fresagem e estocagem.

4.2 Análises das curvas granulométricas

Os ensaios de granulometria foram realizados com amostras de CAF com betume (CCB) e CAF sem betume (CSB). Foram realizados 4 ensaios de granulometria por peneiramento. Um dos resultados do peneiramento de CAF sem ligante está ilustrado na figura 49.

Figura 49 - Peneiramento do CAF sem ligante

Fonte: Autora (2017)

Os resultados dos ensaios estão indicados na tabela 8 juntamente com os valores obtidos dos ensaios de umidade higroscópica de cada amostra.

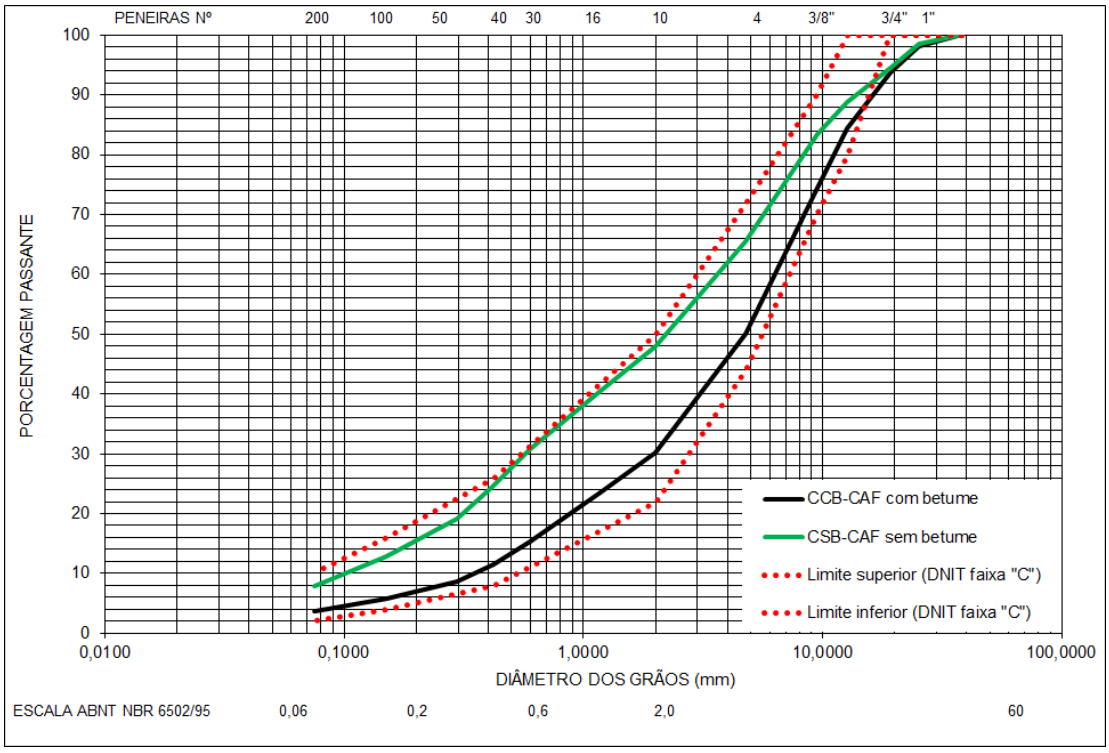
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de granulometria

Peneiras		Amostra CCB			Amostra CSB		
#	(mm)	%Retida média	%Retida acumulada média	%Passante média	%Retida média	%Retida acumulada média	%Passante média
1 1/2"	37,500	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,000	1,77	1,77	98,23	1,57	1,57	98,43
1/2"	19,000	4,53	6,30	93,70	4,00	5,57	94,43
3/4"	12,500	9,37	15,67	84,33	5,73	11,30	88,70
3/8"	9,500	9,77	25,43	74,57	5,30	16,60	83,40
Nº 4	4,750	24,50	49,93	50,07	17,97	34,57	65,43
Nº 10	2,360	19,80	69,73	30,27	17,50	52,07	47,93
Nº 16	1,180	6,63	76,37	23,63	7,13	59,20	40,80
Nº 30	0,600	8,27	84,63	15,37	9,93	69,13	30,87
Nº 40	0,425	3,90	88,53	11,47	6,20	75,33	24,67
Nº 50	0,300	2,83	91,37	8,63	5,53	80,87	19,13
Nº 100	0,150	2,87	94,23	5,77	6,37	87,23	12,77
Nº 200	0,075	2,13	96,37	3,63	4,80	92,03	7,97
Fundo	-	3,63	100,00	0,00	7,97	100,00	0,00
Total	-	100,00		100,00	100,00	-	100,00
Módulo de finura médio (%)		4,98			4,05		
Dimensão máxima característica		25,0 mm			25,0 mm		
Média de umidade higroscópica (%)		-			0,97		

Fonte: Autora (2017)

No gráfico da figura 50 são apresentadas as curvas granulométricas resultantes dos ensaios.

Figura 50 - Curva granulométrica dos materiais CCB e CSB



Fonte: Autora (2017)

Apesar de apresentar significativa porcentagem de finos nos resultados do peneiramento, a análise granulométrica do CAF com betume (CCB) ficou entre os limites superior e inferior da faixa “C” da norma DNIT 034/2005 ES, demonstrando que o fresado possui as características granulométricas especificadas pela norma, para aplicação em projetos de revestimento asfáltico. A curva do fresado sem betume, denominado material (CSB), foi a que apresentou a maior porcentagem de finos, em comparação com os limites da faixa “C”. Segundo Bonfim (1999) apud Araújo (2004), a granulometria do fresado obtida após a extração do betume apresenta uma curva com maior percentual de finos, provavelmente pela quebra de partículas durante o processo de centrifugação da amostra. O mesmo não ocorre com o CAF com ligante, devido à quantidade de grumos presentes no fresado, ou seja, a fração de finos presentes no fresado está envolvida pelo CAP e isso confere ao CAF com betume, uma curva granulométrica com distribuição mais bem graduada.

Há opiniões divergentes quanto ao efeito da fração de finos na modificação das propriedades físicas e mecânicas das misturas. Segundo Bardini (2013), o excesso de finos altera de forma positiva algumas propriedades mecânicas da mistura, tais como o aumento da estabilidade; do módulo de resiliência e da resistência à tração. Para o autor, as partículas finas melhoram o comportamento mecânico do revestimento, por reduzir o volume de vazios entre os agregados graúdos. Essas interações proporcionam melhor trabalhabilidade, aumento da resistência à absorção de água e melhora da resistência ao envelhecimento.

Para Morilha Junior (2004) apud Aguilar (2016) o excesso de finos instabiliza a mistura, por reduzir a interação agregado-betume aumentando a rigidez pelo atrito direto entre as partículas, esse fenômeno leva a mistura a um comportamento frágil e reduz a capacidade de absorção de carga solicitada ao pavimento.

Com os resultados dos ensaios de granulometria e dos percentuais de betume pode-se afirmar que o CAF tem as qualidades necessárias para compor as dosagens de misturas asfálticas recicladas a quente.

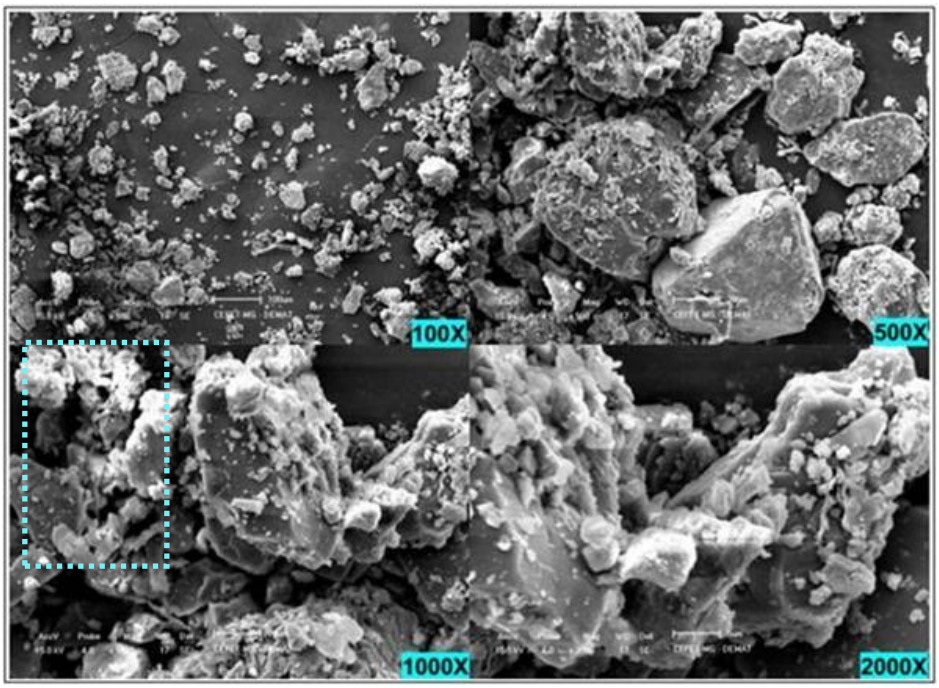
4.3 Caracterização microscópica (MEV) com detector do tipo (EDS)

O microscópico eletrônico de varredura (MEV) acoplado com detectores de elétrons secundários (EDS) foi utilizado com o objetivo de visualizar a topografia, a morfologia do grão e a interação entre os agregados e o CAP oxidado nas amostras de CAF. A técnica possibilitou a definição dos microconstituintes das amostras, o que permitiu melhor entendimento das correlações microestrutura-defeito-propriedade e a inferência do comportamento do material quando essas correlações são estabelecidas.

Os ensaios foram realizados em 4 amostras, sendo 2 amostras de material fino e 2 amostras de material granular. As amostras de CAF com betume foram metalizadas para melhorar a qualidade das imagens. Depois de posicionar o porta amostras no MEV, o equipamento foi acionado para geração das imagens. Após alguns testes para verificação da nitidez das imagens, foram escolhidas ampliações de 100x;

500x; 1000x e 2000x para apresentação dos resultados. As imagens de CAF com betume podem ser observadas na figura 51, no detalhe da ampliação 1000X nota-se o acúmulo de material pulverulento em aglomerações de partículas finas do CAF, envoltos por uma película de ligante. Essas aglomerações de particulados indicam indícios de uma boa interação entre o CAP e as partículas finas do agregado. As formas das partículas mais arredondadas podem ser explicadas pelo cobrimento das arestas dos grãos pelo ligante.

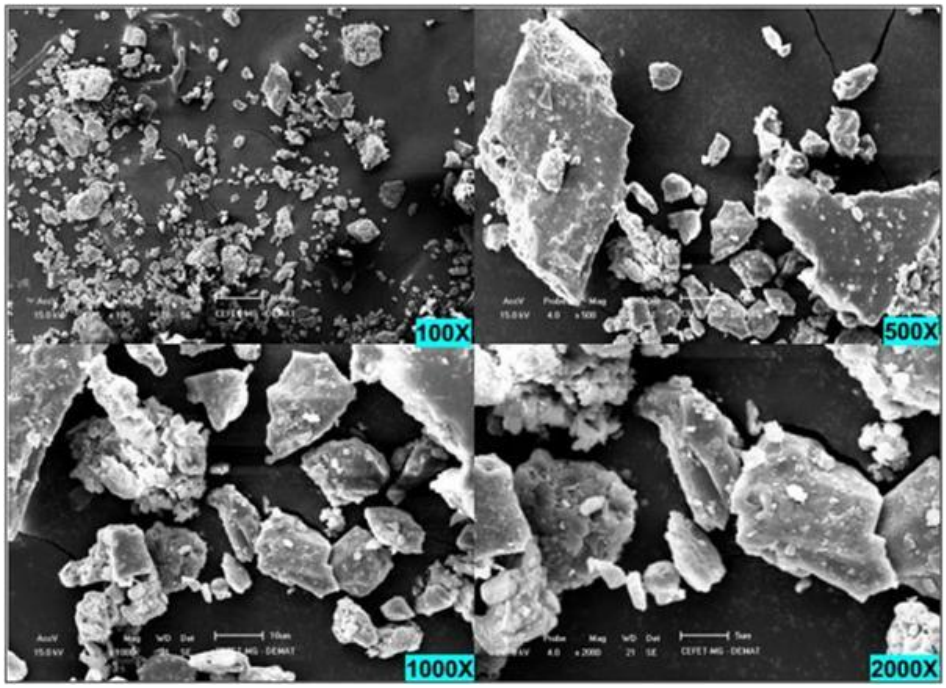
Figura 51 - Topografia dos agregados finos (A1-CAF com betume)



Fonte: Autora (2017)

Na figura 52, que apresenta as imagens de agregados finos sem betume, nota-se o material mais limpo, as formas angulares dos grãos estão bem definidas, possivelmente, pela ausência de ligante.

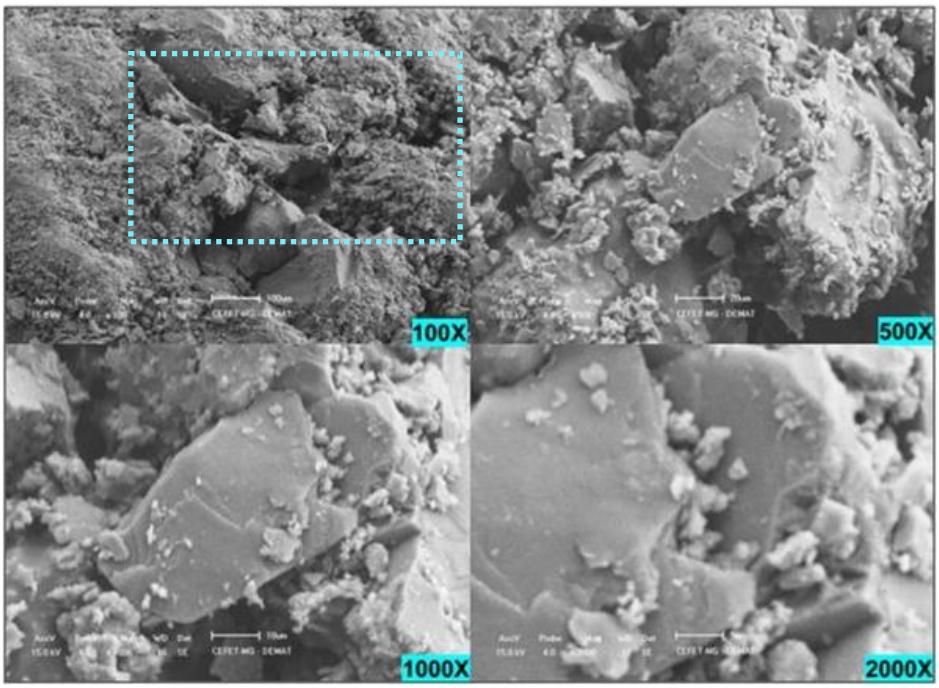
Figura 52 - Topografia dos agregados finos (A2-CAF sem ligante)



Fonte: Autora (2017)

As imagens obtidas dos agregados granulares do CAF com betume estão ilustradas na figura 53.

Figura 53 - Topografia dos grumos do fresado (A3-CAF com betume)

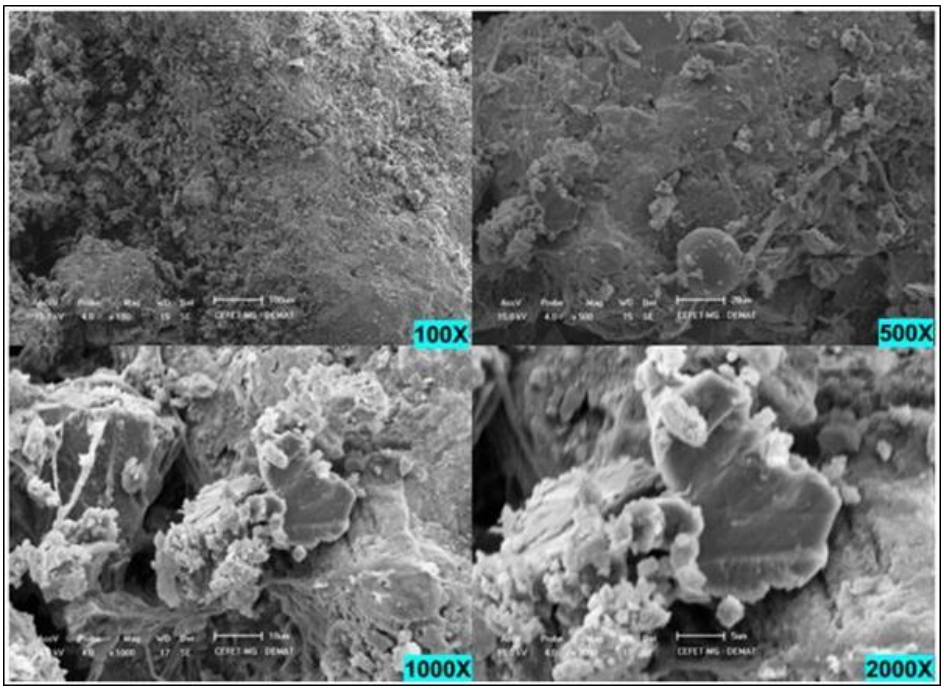


Fonte: Autora (2017)

Os detalhes captados nas imagens das amostras de grumos do fresado, revelam a interação entre o CAP oxidado e os agregados graúdos envoltos em concreções de agregados finos com ligante (figura 53). Em alguns pontos da amostra é possível a visualização de pequenas cavidades formadas, possivelmente, durante a compactação da mistura, isso pode ocorrer tanto pela perda de viscosidade do ligante, quanto pela variabilidade de tamanho dos agregados.

A amostra A4 (CAF sem betume) apresentou-se mais fragmentada, provavelmente pelo processo de centrifugação do fresado durante a extração de CAP. A presença de alguns sulcos ou cavidades dispersas podem ser observadas na figura 54.

Figura 54 - Topografia dos grumos do fresado (A4-CAF sem betume)

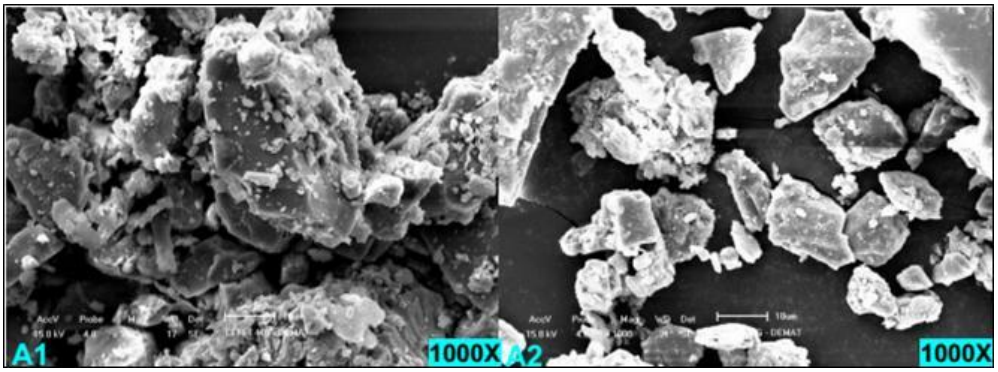


Fonte: Autora (2017)

O MEV acoplado com espectrometria de energia dispersiva de raios X (EDS) produz imagens com as mesmas ampliações. Como o objetivo foi caracterizar pontualmente os microconstituintes básicos das amostras do fresado, optou-se pela ampliação das imagens em 1000x, buscando um ponto que pudesse representar qualitativamente uma região típica do CAF.

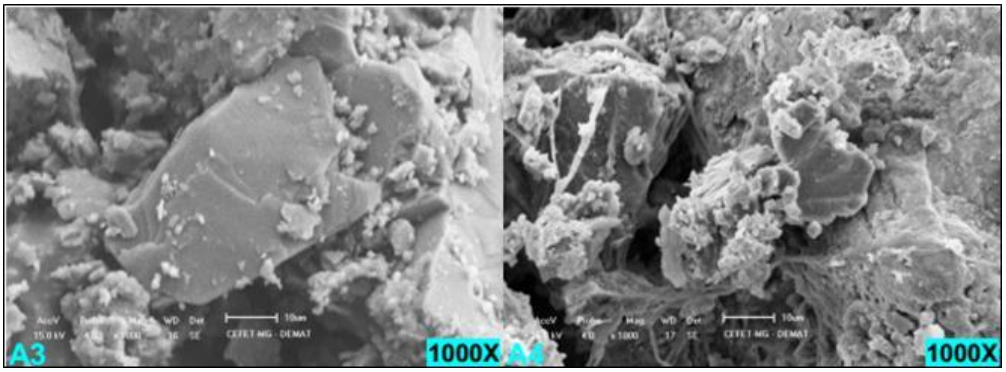
As figuras 55 e 56 apresentam as imagens de onde foram captados os espectros que identificaram os microconstituintes básicos presentes no CAF.

Figura 55 - EDS - Agregados finos com CAP (A1) e sem CAP (A2)



Fonte: Autora (2017)

Figura 56 - EDS - Grumos com CAP (A3) e sem CAP (A4)

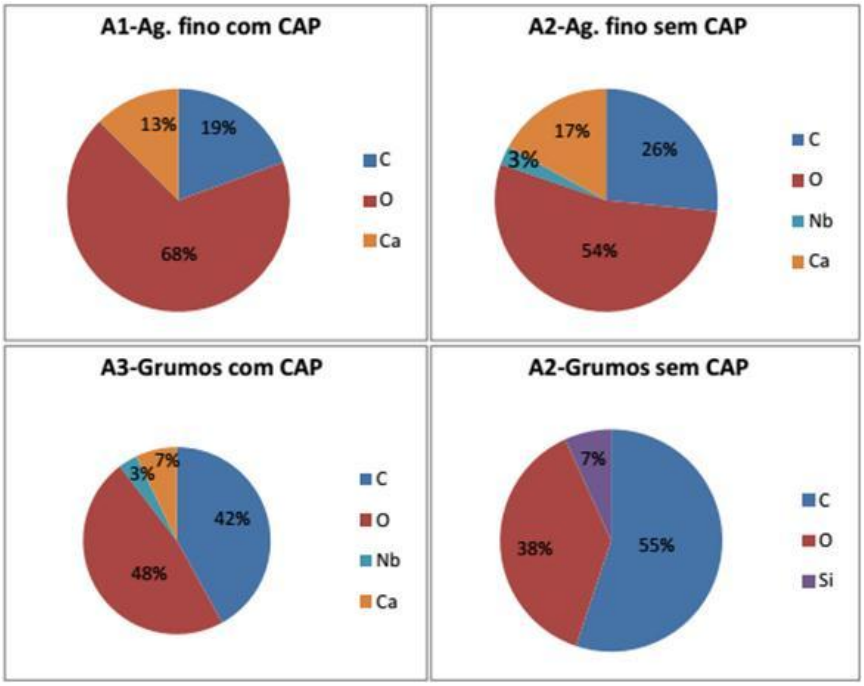


Fonte: Autora (2017)

As regiões pontuais pesquisadas pela técnica de EDS identificaram a presença de carbono, oxigênio, silício, cálcio e nióbio, definidos pelos espectros característicos destes elementos. Os gráficos com as porcentagens dos elementos identificados nas amostras de CAF estão organizados na figura 57. As porcentagens mais significativas obtidas na microcaracterização do fresado foram de oxigênio e carbono, essa quantidade maior desses elementos pode ser explicada pela presença de CAP, em cuja constituição há ambos os elementos.

Os fragmentos de rocha calcária podem ter sido a opção utilizada, como agregado, nas composições das Misturas Asfálticas Usinadas a Quente (MAUQ), de onde se obteve o CAF. Os agregados constituídos por rochas calcárias possuem baixo teor de silicatos em sua formação, são conhecidos por conferir boa adesividade ao CAP.

Figura 57 - EDS pontual regiões A1, A2, A3 e A4



Fonte: Autora (2017)

A utilização da técnica de MEV acoplado ao EDS possibilitou conhecer as características dos agregados quanto a sua adesividade ao ligante; a identificação dos microconstituintes presentes nas amostras do fresado e ainda como os materiais, que compõem as misturas asfálticas, se organizam ao serem compactados.

4.4 Determinação das densidades aparente e real e absorção de água do CAF

Os resultados dos ensaios de densidade aparente, densidade real e absorção de água dos agregados do fresado estão descritos na tabela 9.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de densidade e absorção de água do CAF

Agregados do CAF					
Amostras	Granular			Fino	Média das densidades real (g/cm³)
	γ_{ag} densidade aparente (g/cm³)	γ_{rg} densidade real (g/cm³)	A_a Absorção (%)	γ_{rm} densidade real (g/cm³)	
CSB	2,692	2,561	1,89	2,679	2,620

Fonte: Autora (2017)

A densidade real média obtida para o fresado foi de 2,620 g/cm³, este valor está dentro da variação esperada para o tipo de material, observando-se alguns trabalhos realizados com fresado, Silva (2016) obteve média de 2,648 g/cm³ para o material denominado “C” e Fonseca (2018) obteve em sua pesquisa média de 2,655 g/cm³.

A alta porcentagem de absorção de água pelos agregados graúdos (1,89%) poderá ser explicada pela porosidade, característica do tipo de agregado (calcário) presente no fresado. O alto índice de absorção de água pelo fresado, ainda pode ter sido potencializado pelos intemperismos físico e químico e pelas fraturas mecânicas sofridas pelo material durante a operação da via. Os planos de ruptura formados pelas fraturas mecânicas aumentam a superfície específica dos agregados e consequentemente a sua absorção de água.

4.1.1 Determinação da densidade máxima teórica (G_{mm}) das misturas

Na tabela 10 são apresentados os resultados das densidades máximas teóricas (G_{mm}) de todas as misturas não compactadas. Os valores de G_{mm} serão utilizados nas determinações das propriedades volumétricas das misturas compactadas.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios G_{mm}

Grupo	Mistura	Teor de CAP (%)	G_{mm}	Média (G_{mm})
G1	MR	5,4 (*)	2,498	2,446
G2			2,440	
G3			2,401	
G1	M1	6,0	2,467	2,435
G2			2,380	
G3			2,458	
G1	M2	6,5	2,427	2,379
G2			2,353	
G3			2,358	

(*) Teor de CAP oxidado extraído do fresado.

Fonte: Autora (2018)

O ligante virgem não fez parte das dosagens das misturas de referências “MR”. O maior valor de densidade máxima teórica (G_{mm} = 2,498) foi obtido no ensaio da mistura “G1MR”, que possuía o menor teor de asfalto, sendo este o próprio ligante

oxidado presente no fresado. Na pesquisa de Fonseca (2018) foi encontrado o valor de 2,539, para teor de CAP igual a 5,4%.

Observou-se que, o aumento do teor de ligante virgem nas dosagens reduziu os valores de densidade máxima teórica das misturas. A película asfáltica, que envolve os materiais granulares da mistura não compactada, contribui para selar os poros dos agregados, reduzindo-se a sua saturação durante o processo de aplicação de vácuo no ensaio. Quando o agregado não é devidamente envolto pelos aglutinantes, a durabilidade da mistura compactada pode ser afetada pela percolação e ou infiltração de água.

4.5 Propriedades volumétricas das misturas compactadas

Os cálculos dos parâmetros volumétricos das misturas compactadas, densidade aparente (G_{mb}); índice de absorção de água; índice de vazios; volume de vazios (VV); vazios do agregado preenchidos com betume (VCB); vazios do agregado mineral (VAM); relação betume vazio (RBV) e o grau de compactação (GC) da amostragem ensaiada estão descritos na tabela 11. A partir dos resultados das propriedades volumétricas foram feitas as seguintes análises.

Tabela 11 - Propriedades volumétricas das misturas compactadas

Características físicas dos CP	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3			Referência DNIT 34/2005 ES
	MR (*)	M1	M2	MR (*)	M1	M2	MR (*)	M1	M2	
Ligante virgem (%)	0	0,6	1,1	0	0,6	1,1	0	0,6	1,1	4,5% a 9,0%
CAP + REOB (%)	5,94	6,60	7,47	5,94	6,60	7,47	6,48	7,20	7,80	4,5% a 9,0%
Volume (cm^3)	610,60	606,77	596,98	593,26	602,29	596,93	559,21	523,24	532,17	-
G_{mb} (g/cm^3)	1,77	1,90	1,96	1,95	1,92	1,99	2,10	2,21	2,15	-
G_{mm}	2,498	2,467	2,427	2,440	2,380	2,353	2,401	2,458	2,358	-
A_a (%)	5,89	6,64	9,13	11,10	6,64	7,72	9,14	5,65	5,09	≤ 6% (**)
I_v (%)	10,38	12,00	17,04	20,17	12,32	14,67	17,47	11,29	10,14	-
Vv (%)	29,03	23,20	19,15	20,07	19,47	15,12	12,46	10,05	8,71	3% a 5%
VCB (%)	9,37	11,10	12,46	10,30	11,22	12,65	11,10	12,95	11,38	-
VAM (%)	38,40	34,30	31,61	30,37	30,69	27,77	23,56	23,00	20,09	min. 14%
RBV (%)	25,05	32,41	39,56	34,32	37,44	45,94	47,40	56,41	56,88	75 a 82%
GC (%)	104,80	106,07	107,82	107,38	110,08	111,49	109,17	106,50	111,02	> 97%

Observações:

Grupo 1: Misturas desenvolvidas com frações de CAF, cal, pó de borracha, REOB e ligante virgem.

Grupo 2: Misturas desenvolvidas com frações de CAF, pó de borracha, REOB e ligante virgem.

Grupo 3: Misturas desenvolvidas com frações de CAF, REOB e ligante virgem.

(*) Às misturas asfálticas de referência, denominadas "MR", não foi adicionado ligante virgem.

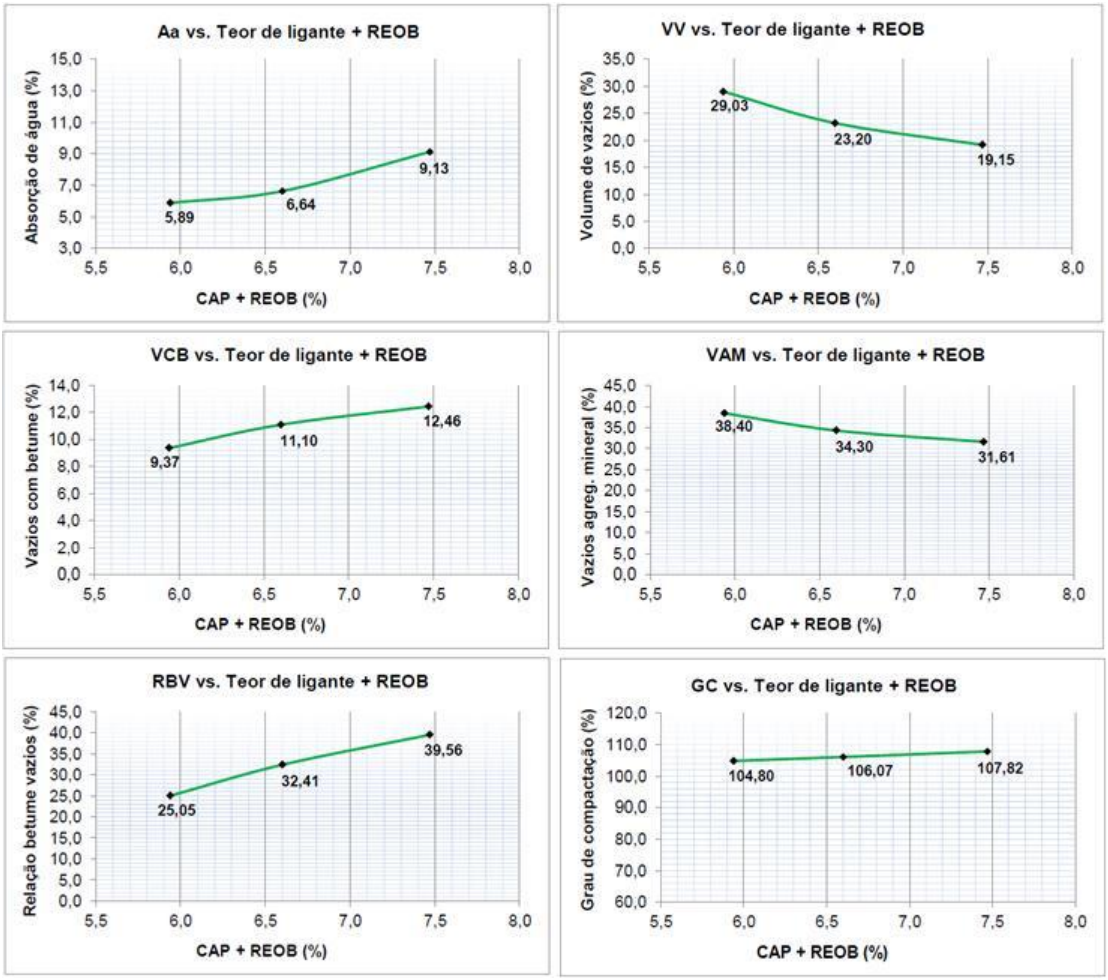
(**) Parâmetro referenciado pela norma NBR 9781/2013.

Fonte: Autora (2018)

As adições de REOB, material utilizado na pesquisa como **a**gente rejuvenescedor e modificador das propriedades das misturas, foram cuidadosamente estudadas para que as variações dos percentuais de betume fossem mantidas dentro da faixa “C”, recomendada pelo DNIT. As maiores porcentagens de ligante virgem e REOB (7,80%) foram adicionadas à mistura G3M2.

Nenhuma das misturas atendeu ao parâmetro RBV, cuja faixa de variação especificada pela norma está entre 75% e 82%. Nos trabalhos de reciclagem asfálticas de Aguilar (2016), contendo o mesmo percentual de betume, o parâmetro RBV também não foi atendido por nenhuma de suas misturas. Observando-se os gráficos das figuras 58, 59 e 60 é possível verificar a proporcionalidade entre o aumento do percentual da RBV e o aumento das frações de ligante virgem e REOB nas misturas.

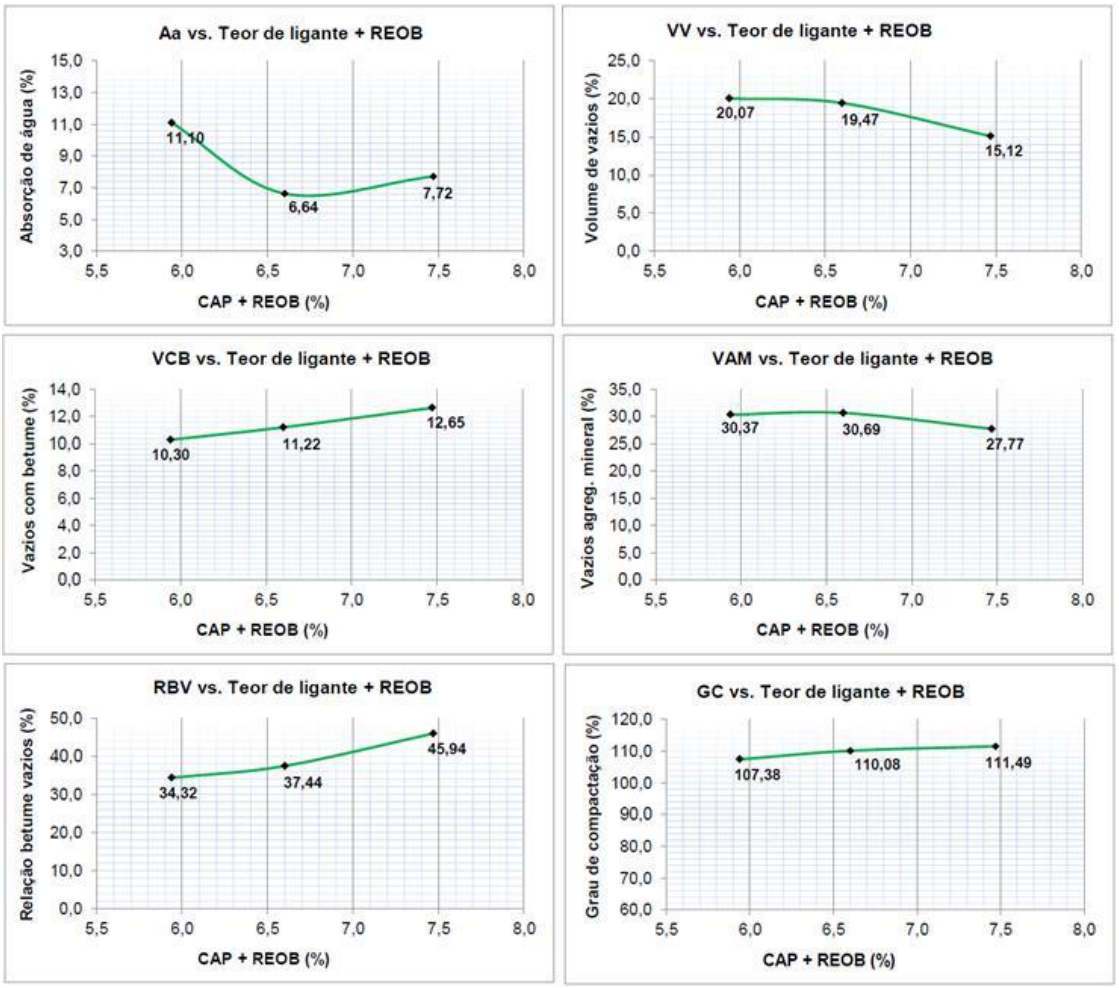
Figura 58 - Propriedades volumétricas das misturas do grupo G1



Fonte: Autora (2017)

Considerando-se os valores de referência especificados pela norma DNIT 34/2005 ES, os resultados dos ensaios realizados nas misturas compactadas não atenderam aos critérios da norma em 100%. Comparando-se as misturas de referência “MR” com as misturas “M1” e “M2”, verificou-se que os valores das densidades aparentes (G_{mb}) possuem tendência ao aumento à medida que se adiciona os percentuais de 0,6% (M1) e 1,1% (M2) de CAP às dosagens. Esse parâmetro influencia na variabilidade de todas as propriedades volumétricas, quanto maior a densidade aparente (G_{mb}), menor será o volume de vazios (VV) das misturas compactadas. As misturas com volumes de vazios (VV) menores proporcionam maiores durabilidade e resistência ao pavimento.

Figura 59 - Propriedades volumétricas das misturas do grupo G2

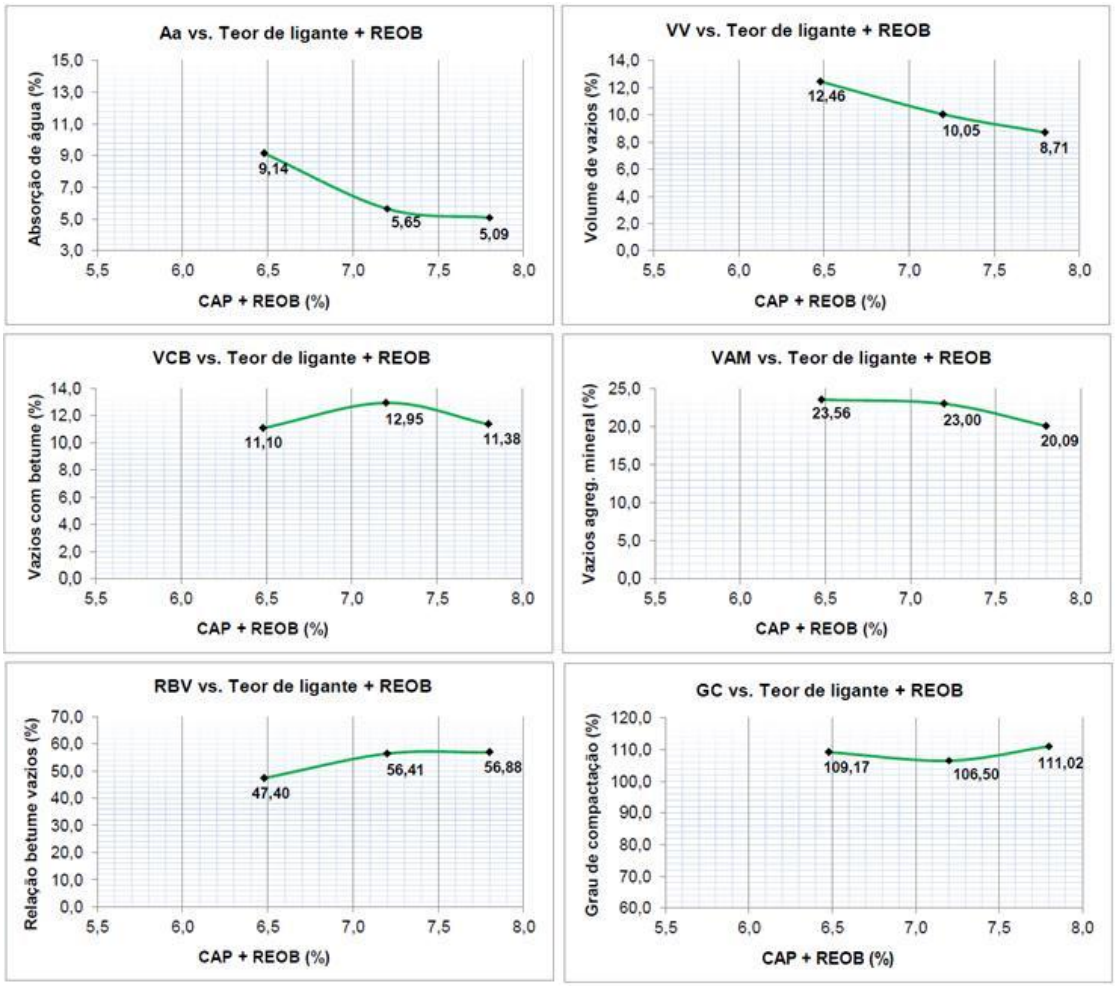


Fonte: Autora (2017)

Observando-se o valor de referência para o índice de absorção de água, apenas as misturas G1MR, G3M1 e G3M2 atenderam a esse critério. Apesar da mistura G1MR

ter atendido ao critério de referência, nota-se que a adição de ligante virgem às misturas, diminuiu a absorção de água e consequentemente o índice de vazios. Com os resultados dos ensaios de absorção de água ainda é possível inferir que, a adição de ligante virgem à mistura melhora a interação entre as partículas do fresado aumentando o grau de compactação (GG) das misturas. O ligante asfáltico auxilia no fechamento e impermeabilização dos poros das misturas compactadas, elevando a resistência mecânica e impedindo a deterioração física e química do pavimento.

Figura 60 - Propriedades volumétricas das misturas do grupo G3



Fonte: Autora (2017)

Embora nenhuma das misturas tenha atendido ao valor de referência para o Volume de Vazios (VV), os corpos de prova da mistura G3M2 foram os que apresentaram menor VV, confirmando a redução do volume de vazios em função do aumento do teor de CAP nas misturas. Fonseca (2018), em uma de suas misturas recicladas a

quente, conseguiu atender a este critério, com VV igual a 4,25%, após utilizar 3,1% de CAP virgem.

Em todas as misturas estudadas o parâmetro VAM atendeu ao critério estabelecido pela norma DNIT 34/2005 ES, apresentando valores superiores à variação de mínima especificada de 14% tanto para o tamanho nominal máximo do agregado do fresado que é de 25 mm, quanto para o valor de 18% especificado para o tamanho nominal mínimo do agregado do fresado que é de 9,5 mm.

O índice de absorção de água das misturas asfálticas compactadas é uma propriedade volumétrica que está ligada diretamente à resistência, qualidade e durabilidade do pavimento. Para as amostras estudadas, observou-se que ao adicionar ligante virgem às misturas, ocorreram alterações significativas nas propriedades volumétricas, como o aumento da densidade aparente (G_{mb}) e reduções da absorção de água e do índice de vazios. Vê-se que o ligante asfáltico, confere à mistura compactada a impermeabilização necessária para impedir a percolação de água e os danos físicos e químicos causados por esse fenômeno.

A presença de maiores quantidades de CAP e REOB nas misturas estudadas contribuiu para melhorar a interação entre as frações granulométricas do fresado, além de selar os poros das misturas, proporcionando uma maior redução do índice de vazios das misturas compactadas.

4.6 Estabilidade e fluência Marshall

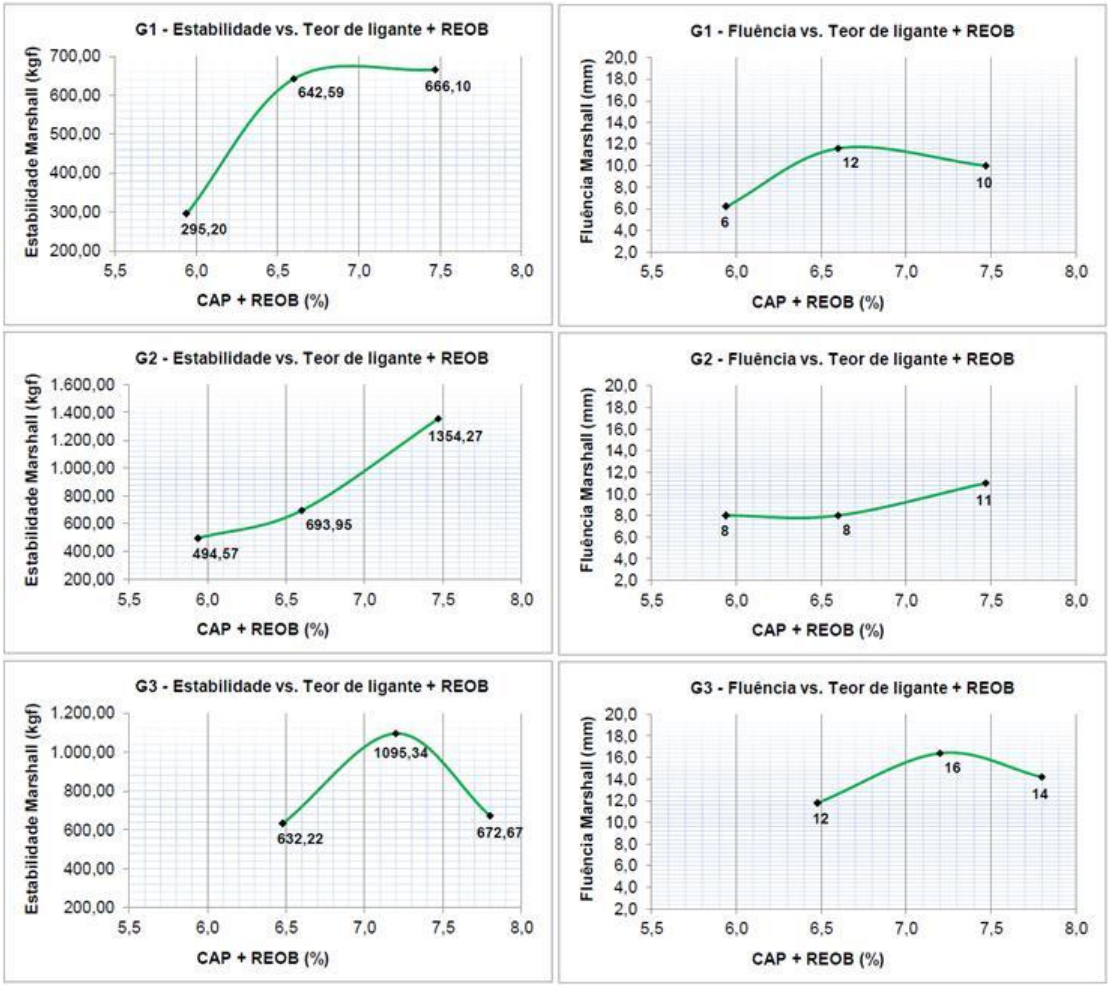
Para realização dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall foram utilizados 45 corpos de prova para 9 tipos de dosagens, os resultados são apresentados, por grupo de misturas, na tabela 12 e nos gráficos da figura 61.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall

Grupos	Misturas	% CAP virgem	Estabilidade			Fluência		
			Estabilidade corrigida (kgf)	Variância	Desvio Padrão	Fluência (mm)	Variância	Desvio Padrão
G1	MR	0%	295,2	1281,4	35,8	6,2	2,6	1,6
	M1	0,60%	642,6	41211,9	203,0	11,6	10,2	3,2
	M2	1,10%	666,1	21908,0	148,0	10,0	10,8	3,3
G2	MR	0%	494,6	4589,7	67,7	8,0	0,8	0,9
	M1	0,60%	693,9	125345,0	354,0	8,0	1,2	1,1
	M2	1,10%	1354,3	86452,9	294,0	11,0	1,6	1,3
G3	MR	0%	632,2	15370,7	124,0	11,8	0,2	0,4
	M1	0,60%	1095,3	96543,3	310,7	16,4	0,2	0,5
	M2	1,10%	672,7	41219,8	203,0	14,2	7,0	2,6

Fonte: Autora (2018)

Figura 61 - Resultados dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall



Fonte: Autora (2017)

Em relação aos ensaios de estabilidade e fluência Marshall os resultados ficaram entre 295,20 kgf e 1354,27 kgf, com exceção para as misturas G1MR e G2MR, todas as demais misturas atenderam ao requisito de estabilidade mínima especificada pela norma DNIT 34/2005 ES (500 kgf para 75 golpes).

As Misturas de Referência “MR” continham em suas dosagens todos os materiais utilizados na pesquisa, exceto o ligante virgem. A cal, presente apenas nas misturas do grupo G1, não contribuiu efetivamente para o aumento da resistência mecânica das misturas. Comparando-se os resultados dos três grupos, nota-se que as misturas dos grupos G2 e G3 apresentaram aumento da estabilidade em relação às misturas do grupo G1, que continham em suas dosagens 1% de cal. Esse fato pode ter ocorrido devido à quantidade de material pulverulento presente no fresado, que compôs as misturas. Em casos como este seria necessário maior teor de betume para melhorar a homogeneização da mistura.

O pó de borracha contribuiu para melhorar o desempenho mecânico das misturas, como esse material possui propriedades aglutinantes, ao adicioná-lo às dosagens, a interação entre os materiais das misturas foi aumentada.

A única mistura de referência G3MR, que atendeu ao critério especificado pela norma, apresentou valor de estabilidade de 632,22 kgf. O aumento de 28% no valor da estabilidade da mistura G3MR em relação à mistura G2MR pode ser explicado, pelo aumento do teor de REOB nessas misturas, que passou de 10% (G2MR) para 20% (G3MR).

O resultado da mistura de referência de Fonseca (2018), reciclada a quente sem acréscimo de CAP virgem, apresentou valor igual a 412,3 kgf, inferior ao especificado pela norma. Por possuir apenas o ligante do fresado, o valor de estabilidade mais baixo (295,20 kgf) foi obtido nos ensaios da mistura de referência G1MR. Os resultados dos ensaios dessa mistura podem ter sido afetados pela adição de cal, que por falta de ligante virgem, deixou a mistura com menor trabalhabilidade.

De uma forma geral, a estabilidade das misturas aumentou com a inserção dos conteúdos de ligante virgem e REOB. Os valores altos de fluência indicam que as misturas apresentam propriedade elasto-plástica mais elevada. Contudo, considerando-se que a aplicação a frio do asfalto será em área confinada, os valores de fluência obtidos nos ensaios não afetarão o desempenho mecânico das misturas durante operação da via.

4.7 Resistência à tração por compressão diametral

Os projetos de misturas asfálticas são dimensionados para se obter valores de resistências à tração capazes de suportar as solicitações impostas pelas cargas dinâmicas aplicadas ao pavimento, sem que a estrutura venha se deformar. A resistência à tração do revestimento asfáltico é um critério de projeto que está diretamente vinculado à qualidade e durabilidade da estrutura do pavimento. Quanto maior for a resistência à tração do revestimento, menores serão os efeitos deletérios causados pelos esforços cíclicos atuantes na camada de rolamento.

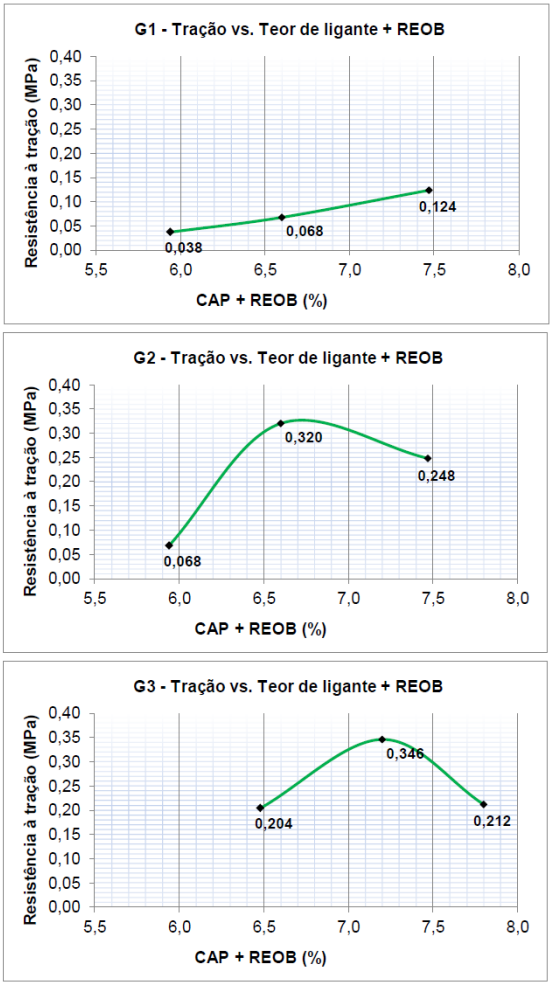
Comparando-se os valores de resistência à tração das misturas G1MR com as misturas G1M1 e G1M2 indicados na tabela 13 e figura 62, percebeu-se que as inserções de 0,6% de CAP virgem à mistura G1M1 e 1,1% de CAP virgem à mistura G1M2, promoveram um expressivo aumento na resistência à tração das misturas compactadas.

Tabela 13 - Resistência à tração por compressão diametral dosagens

Grupos	Misturas	% CAP virgem	Tensão média (MPa)	Variância	Desvio Padrão
G1	MR	0%	0,038	0,000	0,015
	M1	0,60%	0,068	0,001	0,037
	M2	1,10%	0,124	0,001	0,024
G2	MR	0%	0,068	0,000	0,018
	M1	0,60%	0,320	0,027	0,164
	M2	1,10%	0,248	0,003	0,055
G3	MR	0%	0,204	0,002	0,043
	M1	0,60%	0,346	0,021	0,144
	M2	1,10%	0,212	0,001	0,033

Fonte: Autora (2018)

Figura 62 - Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autora (2018)

Considerando-se os valores das misturas de referência de todos os grupos, a mistura G3MR foi que apresentou maior valor de resistência, provavelmente pelo teor máximo de REOB (20% em relação ao peso de CAP) adicionado a ela que, para além de recuperar as propriedades do ligante oxidado, conferiu a mistura aumento significativo de resistência e melhor interação entre os agregados do fresado.

A inserção de cal à mistura aumentou o teor de finos, o que pode ter contribuído para reduzir a resistência à tração da mistura G1MR, essa mistura apresentou resistência inferior à mistura G3MR preparada apenas com CAF e REOB. Nota-se, no grupo de misturas G2, que ao retirar a fração de cal das dosagens ocorreu aumento expressivo da resistência em todas as misturas. Ao analisar a influência da adição de pó de borracha nas misturas, verificou-se que não houve alterações significativas nas resistências das misturas G2M1 e G3M1.

Conforme tabela 13, ocorreram quedas nos valores das resistências das misturas “M2” (teor de CAP 1,1%), em relação às misturas “M1” (teor de CAP 0,6%) dos grupos G2 e G3. Esse resultado reforça a ideia de que o aumento dos conteúdos de REOB e ligante virgem devem ser cuidadosamente calculados, pois a adição desses materiais interfere significativamente no aumento ou redução da resistência mecânica das misturas compactadas.

As menores resistências à tração foram observadas nos rompimentos dos corpos de prova das misturas de referência “MR”, que não continham em suas dosagens a adição de ligante virgem. A fração máxima de REOB adicionada às misturas (20% do teor de CAP em peso) conferiu um acréscimo de resistência de 19% à mistura de referência G3MR. Entretanto, tanto este valor, como os demais valores obtidos nos resultados dos ensaios de resistência à tração não atenderam ao valor de referência especificado pela da norma DNIT 34/2005 ES, que estabelece resistência mínima à tração igual a 0,65 MPa. Fonseca (2018) obteve valores de resistência à tração com variação entre 0,17 e 0,34 MPa, para os mesmos teores de ligante. Ainda na pesquisa de Fonseca (2018), as misturas recicladas que continham maiores teores de ligante apresentaram resistência à tração menor, que as misturas de referência MR, cujas dosagens não possuíam frações de CAP virgem.

A partir dos resultados dos ensaios de resistência à tração de todas as misturas, pode-se inferir que o aumento do conteúdo de ligante virgem até um ponto máximo, que se pode chamar de teor ótimo de betume, altera, de forma positiva, o comportamento mecânico das misturas compactadas. A partir desse ponto máximo, a adição de betume torna-se prejudicial à resistência da mistura, podendo comprometer o desempenho e a durabilidade do pavimento.

5 ENERGIA DE COMPACTAÇÃO EM MISTURAS MOLDADAS A FRIO

Os corpos de prova, de forma geral, apresentaram áreas preferenciais de ruptura e desintegração de material. Essas áreas podem ser visualizadas nos CP moldados para mistura G3MR, figura 63. A deficiência na moldagem a frio dos CP compromete os resultados de caracterização física e mecânica, devido à alta porosidade formada pela dispersão granulométrica. Neste caso, o aumento da energia de compactação contribui para melhoria dos parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas.

Figura 63 - Aspecto dos CP após compactação

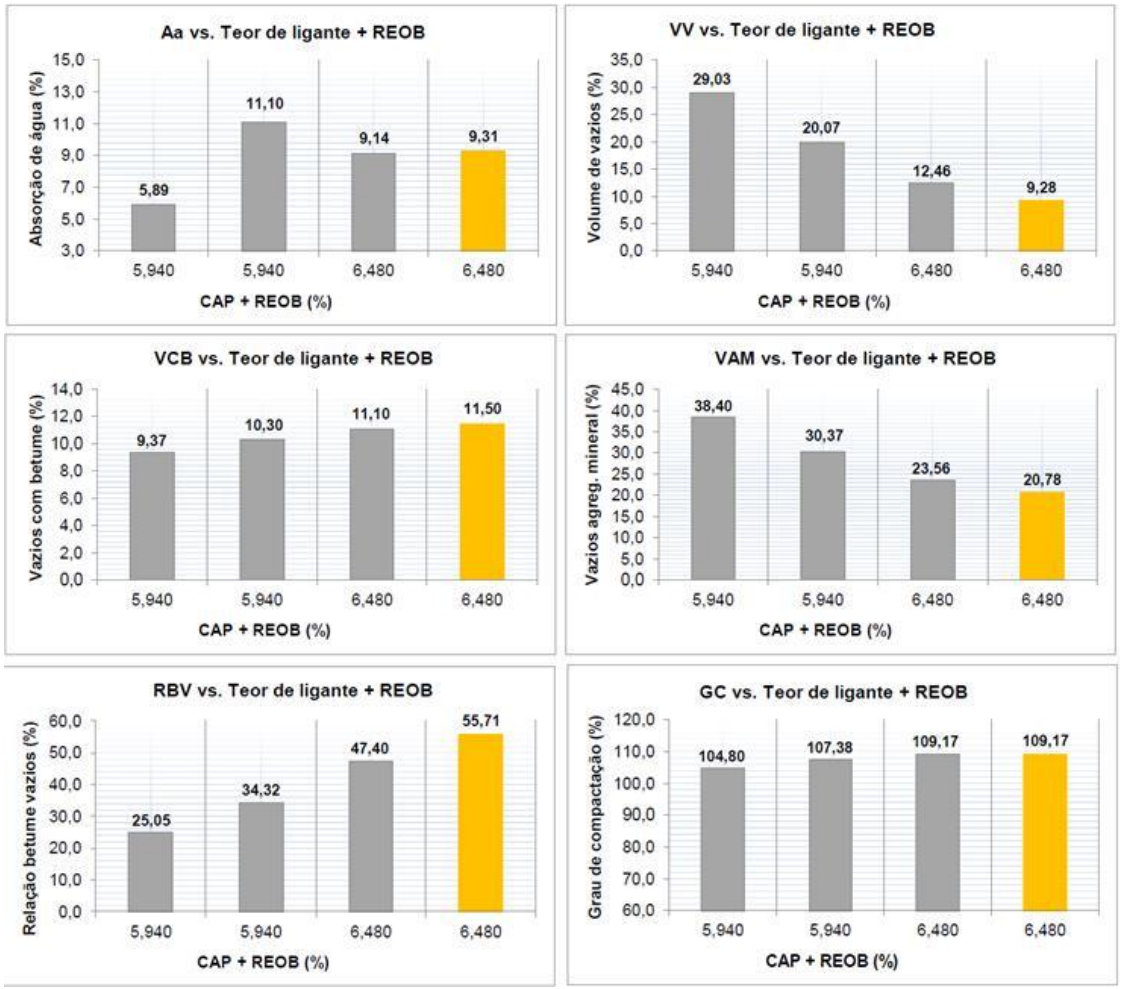
Fonte: Autora (2018)

Após avaliação dos resultados dos ensaios mecânicos realizados para as misturas de referência “MR”, observou-se que a mistura G3MR atendeu ao critério de estabilidade mínima especificada pela norma DNIT 034/2005 ES, obtendo valor igual a 632,22 kgf para 75 golpes. Dentre as misturas que atenderam ao critério de estabilidade mínima especificada pela norma, essa mistura é a que possui a dosagem mais viável economicamente. Considerando-se a viabilidade econômica

dessa mistura, optou-se por moldar novos CP, utilizando-se a mesma dosagem, mas compactados com energia de compactação igual a 95 golpes, por face. O objetivo foi avaliar o quanto o aumento da energia de compactação influenciaria no comportamento dessa mistura. Para essa avaliação foram confeccionados 6 corpos de prova, 3 para os ensaios de tração por compressão diametral e 3 CP para os ensaios de estabilidade e fluência Marshall.

Os resultados estão apresentados na figura 64. Para melhor entendimento da variabilidade do comportamento mecânico das misturas analisadas, foram mantidos, nos gráficos, os resultados dos ensaios dos CP moldados com energia de compactação igual a 75 golpes. Os valores salientados na cor amarela são referentes à compactação dos CP com energia igual a 95 golpes.

Figura 64 - Propriedades volumétricas - energia de compactação de 95 golpes

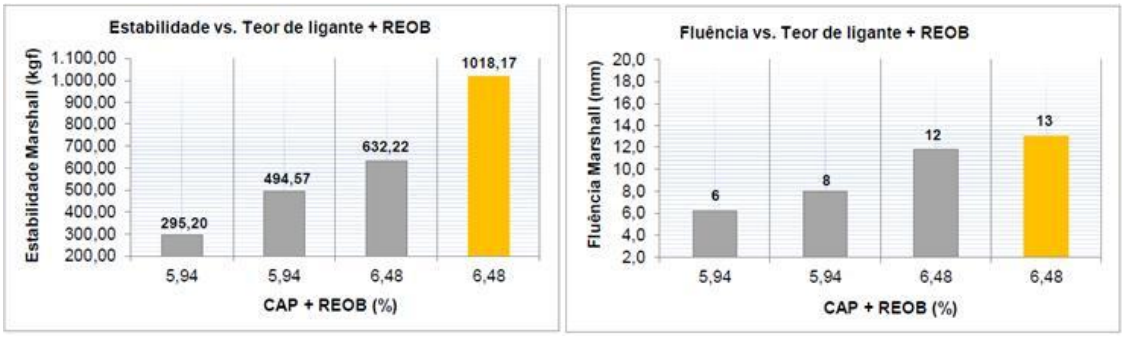


Fonte: Autora (2018)

O aumento da energia de compactação reduziu o VV da mistura e aumentou a RBV, quando comparadas as demais dosagens das misturas de referência moldadas com energia de compactação igual a 75 golpes. O parâmetro GC não alterou com o aumento da energia de compactação de 75 para 95 golpes.

Comparando-se os resultados dos ensaios de estabilidade, figura 65, o aumento da energia de compactação para 95 golpes aumentou em 61% a estabilidade da mistura G3MR. Esse resultado indica que o REOB além de restaurar as propriedades do CAP oxidado presente no resíduo, contribuiu para modificar de forma positiva as propriedades volumétricas das misturas.

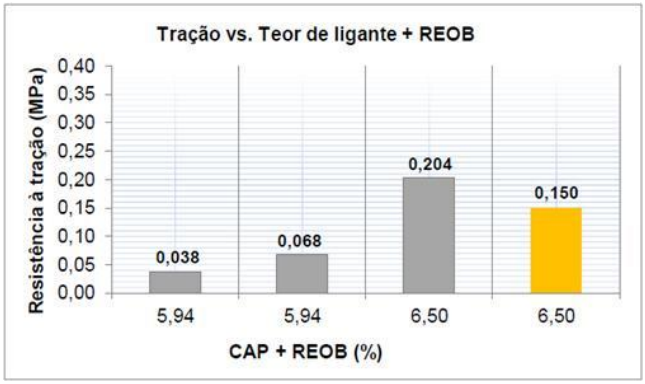
Figura 65 - Estabilidade e fluência - energia de compactação de 95 golpes



Fonte: Autora (2018)

Diferente do que se previu, os resultados de resistência à tração da mistura G3MR, figura 66, diminuíram com CP moldados com maior energia de compactação. O CAP oxidado pode diminuir a trabalhabilidade da mistura pela redução da fase maltene do betume, o que contribui para a redução da resistência à tração.

Figura 66 - Resistência à tração - energia de compactação de 95 golpes



Fonte: Autora (2018)

Na moldagem a frio, a interação entre os materiais é menor em relação à moldagem a quente. Entretanto, os resultados obtidos para cada dosagem não podem ser analisados isoladamente, pois dependem de outras variáveis, tais como teor de ligante virgem, temperatura de ensaio e moldagem, grau de eficiência e calibração dos equipamentos.

Os resultados mostraram que as características volumétricas e mecânicas das misturas melhoraram com o aumento da energia de compactação. Na aplicação de energias de compactação mais elevadas, os agregados formam um arranjo estrutural mais denso, promovendo a redução do VAM e consequentemente o aumento da estabilidade e rigidez da mistura.

6 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO

Considerou-se, como critério de aceitação das misturas estudadas, a estabilidade Marshall dos CP com valores maiores que 500 kgf para 75 e 95 golpes. Na tabela 14 são apresentados todos os valores de estabilidade Marshall obtidos nos ensaios das misturas pesquisadas. Os valores salientados na cor vermelha indicam não atendimento às referências das normas.

Tabela 14 - Critério de aceitação para as misturas estudadas

Características físicas dos CP	Grupo - G1			Grupo - G2			Grupo - G3				Referência DNIT 34/05 ES
	MR	M1	M2	MR	M1	M2	MR	MR[(4)]	M1	M2	
Ligante virgem (%)	0	0,6	1,1	0	0,6	1,1	0	0	0,6	1,1	4,5% a 9,0%
G_{mm}	2,498	2,467	2,427	2,440	2,380	2,353	2,401	2,401	2,458	2,358	-
A_a (%)	5,89	6,64	9,13	11,10	6,64	7,72	9,14	9,31	5,65	5,09	≤ 6% (*)
I_v (%)	10,38	12,00	17,04	20,17	12,32	14,67	17,47	17,96	11,29	10,14	-
Vv (%)	29,03	23,20	19,15	20,07	19,47	15,12	12,46	9,32	10,05	8,71	3% a 5%
VCB (%)	9,37	11,10	12,46	10,30	11,22	12,65	11,10	11,50	12,95	11,38	-
VAM (%)	38,40	34,30	31,61	30,37	30,69	27,77	23,56	20,82	23,00	20,09	min. 14%
RBV (%)	25,05	32,41	39,56	34,32	37,44	45,94	47,40	55,61	56,41	56,88	75 a 82%
GC (%)	104,80	106,07	107,82	107,38	110,08	111,49	109,17	109,12	106,50	111,02	> 97%
Estabilidade Marshall	295,20	642,59	666,10	494,57	693,95	1354,27	632,22	1018,17	1095,34	672,67	≥ 500 kgf (**) / 75 golpes
Critério de aceitação	N	S	S	N	S	S	S	S	S	S	-

Legenda:
S Sim
N Não
(*) NBR 9781/2013.
(**) DNER-ME 043/95

Notas: 1 - G1MR: 1% cal, 10% REOB, 10% pó de borracha; G1M1: 1% cal, 10% REOB, 20% pó de borracha, 0,6 % CAP 50/70; G1M2: 1% cal, 15% REOB, 15% pó de borracha, 1,1 % CAP 50/70.

2 - G2MR: 10% REOB, 10% pó de borracha; G2M1: 10% REOB, 20% pó de borracha, 0,6 % CAP 50/70; G2M2: 15% REOB, 15% pó de borracha, 1,1 % CAP 50/70.

3 - G3MR: 20% REOB; G3M1: 20% REOB, 0,6 % CAP 50/70; G3M2: 20% REOB, 1,1 % CAP 50/70.

4 - Corpos de prova moldados com energia de compactação igual a 95 golpes

Fonte: Autora (2018)

A mistura G3MR, compactada com energia de compactação igual a 95 golpes, para além de melhorar as propriedades VV, VAM e RBV, teve aumento de estabilidade de 62% em relação ao CP de mesma mistura, compactado com energia de compactação igual a 75 golpes. Com esses resultados é possível notar que, o aumento da energia de compactação tende a melhorar as propriedades das misturas.

7 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentam-se as conclusões e considerações baseadas nas análises dos resultados dos ensaios de laboratório.

- **Caracterização do CAF: percentual de betume; granulometria; MEV com EDS; porcentagem de absorção de água e densidades aparente e real.**

A média do percentual de CAP das quatro amostras foi de 5,41%, este valor está dentro da faixa especificada pela norma DNIT 034/2005 ES. O resultado do ensaio de extração de betume do fresado, para além de permitir o preparo das misturas de referência sem a adição de CAP virgem, viabilizou as alternativas de dosagens dos agentes aglutinantes CAP virgem e REOB nas misturas estudadas.

As curvas granulométricas do fresado com e sem betume atenderam aos limites superior e inferior da faixa “C” da norma DNIT 034/2005 ES. De acordo com a revisão bibliográfica, é comum o aumento do percentual de finos depois do processo de fresagem, pela quebra do material granular e após a extração de betume, pela fluidificação do CAP oxidado envolto no material mais fino, esse aumento de material mais fino pode ser observado na curva do CSB.

Nos resultados dos ensaios de MEV com EDS, a presença de cálcio nas amostras do fresado indicam que os agregados graúdos são provenientes de rochas calcárias. Esse tipo de rocha confere à mistura melhor adesividade entre os materiais, por possuir uma maior absorção do ligante, a porosidade é uma característica particular desse tipo de rocha.

O alto índice de absorção de água identificado nos resultados dos ensaios de saturação das amostras de agregados graúdos poderá ser explicado pela porosidade característica da rocha calcária que os originou. As fraturas mecânicas, histórico de tensões do material e intemperismos físicos e químicos também contribuem para o aumento de absorção de água pelo material, formando planos preferenciais para percolação de água. Nos resultados das densidades aparente e

real do fresado, os valores ficaram dentro da variação esperada para o tipo de material, entre 2,50 g/cm³ e 2,90 g/cm³.

De acordo com os resultados dos ensaios de caracterização física realizados nas amostras do fresado, o CAF apresentou as propriedades necessárias para uso em MARQ.

- **Dosagens de cal; pó de borracha, REOB e CAP nas MARQ.**

A fração de cal adicionada em todas as misturas do grupo G1 foi de 1% em peso do CP. Avaliando-se os resultados dos ensaios mecânicos, ao retirar a cal das misturas, observou-se o aumento da resistência à tração e melhora da estabilidade das misturas compactadas.

A adição de pó de borracha conferiu maior estabilidade e resistência à tração em todas as misturas do grupo G2, sendo que a mistura de referência G2MR teve aumento de 40% de resistência em relação à mistura G1MR, que continha cal em sua dosagem. Neste trabalho, a adição do pó de borracha foi condicionada à porcentagem de REOB, tendo ambos os materiais a mesma dosagem na composição de cada mistura.

De forma geral observou-se que o teor de asfalto, até próximo de 7,50% e adições de REOB melhorou algumas propriedades físicas e mecânicas das misturas compactadas. Os acréscimos de CAP e REOB contribuíram de forma significativa para a redução da absorção de água e índice de vazios dos CP. Os valores obtidos nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral variaram de 0,038 a 0,346 MPa, o aumento da resistência ocorreu com a adição de 0,6% de CAP, entretanto, para adições de 1,1% de CAP os valores de resistência à tração diminuíram. Observou-se, também, que a mistura G3M2 reduziu a estabilidade, com a adição do teor de CAP de 1,1%. Com os resultados dos ensaios é possível verificar a influência das adições de CAP e REOB em MARQ.

Comparando-se os valores dos ensaios mecânicos realizados nos CP das misturas de referência “MR”, conclui-se que a porcentagem máxima de REOB adicionada à

dosagem da G3MR contribuiu para o aumento da resistência à tração e estabilidade da mistura compactada. Os CP que continham em suas misturas a fração de cal foram os que apresentaram maior perda de massa durante a desmoldagem. A desintegração identificada pela perda de massa indica que as porcentagens dos agentes aglutinantes estão em dosagens insuficientes para manter a interação entre os materiais das misturas “MR”. Os resultados de baixa resistência obtidos para esses CP também indicam a necessidade de acréscimo de ligante.

- **Ensaio de estabilidade e fluência Marshall**

O ensaio de estabilidade e fluência Marshall viabiliza a adoção do percentual ótimo de betume no desenvolvimento de MARQ. A proporcionalidade observada entre o aumento do valor da estabilidade Marshall e o aumento do conteúdo de betume até certo valor máximo, a partir do qual decrescem os valores de estabilidade, permite definir com maior precisão o teor ótimo de betume a ser adicionado às MARQ. A curva de estabilidade das misturas do grupo G3 tipifica essa proporcionalidade com pico de estabilidade máxima de 1095,34 kgf, para teores de 0,6% de CAP e 20% de REOB, confirmando as dosagens de CAP e REOB como a ideais para essa mistura.

A fluência indica o potencial de flexibilidade da mistura compactada. Valores altos de fluência indicam que a mistura pode conter um teor elevado de CAP. As dosagens desenvolvidas para as misturas recicladas a quente e aplicadas a frio em operações de “tapa-buracos” permitem que sua fluência tenha valores mais altos, pela aplicação específica da mistura. Nesse caso, o movimento da massa compactada será impedido pelo confinamento que as paredes das cavas conferirão ao material, na etapa de compactação da mistura.

- **Ensaio de resistência à tração por compressão diametral**

O comportamento mecânico das misturas compactadas altera significativamente até certo limite máximo de teor de betume, ponto que se pode chamar de teor ótimo de betume, que fica próximo de 7,2%, esse valor corresponde às porcentagens de CAP e REOB adicionadas à mistura G3M1. Embora tenha ocorrido um aumento de

resistência nos CP dos grupos G2 e G3, as dosagens desenvolvidas no processo de reciclagem a quente de CAF não atenderam aos requisitos mínimos determinados pela norma DNIT 034/2005 ES, os valores obtidos nos ensaios de tração estão abaixo das referências mínimas especificadas pela norma, que é 0,65 MPa.

Apesar das misturas não terem atingido o valor mínimo de resistência à tração, especificado pela norma DNIT 34/2005 ES, conclui-se que o CAF possui as características necessárias à fabricação de MARQ. As discussões sobre novas dosagens de CAP e REOB em MARQ devem ser incentivadas até se atingir os parâmetros de desempenho e qualidade exigidos pelas normas.

- **Energia de compactação e moldagem a frio**

A forma angular e a rugosidade dos agregados do CAF dificultam o empacotamento dos materiais. O aumento da energia de compactação melhora o arranjo estrutural formado pelos diferentes tamanhos do agregado, melhorando as propriedades volumétricas como a redução do VV e VAM e o aumento da RBV e da estabilidade e rigidez da mistura.

Considerando-se os resultados da pesquisa experimental, conclui-se que, a aplicação da mistura asfáltica a frio pode ser viabilizada pelo confinamento das paredes da cavidade formada na superfície do revestimento. A retração do material é impedida pelo confinamento promovido por essas paredes.

O adensamento da mistura, promovido pela ação das cargas dinâmicas do tráfego, aumenta a intensidade da compactação e contribui para consolidação da mistura aplicada a frio.

8 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Como sugestões para novas pesquisas indicam-se os seguintes temas de estudos:

- Realização de testes em misturas moldadas a frio, com diferentes energias de compactação.

- Análise de redução no custo de produção de misturas asfálticas fabricadas com 100% de CAF, com diferentes composições de agentes aglutinantes.

- Caracterização dos diferentes tipos de óleo lubrificante de motor rerrefinado, de forma a permitir melhor dosagem do teor ótimo de CAP às misturas.

- Avaliação das propriedades volumétricas das misturas compactadas, a partir da incorporação de hidro-repelentes às composições das dosagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 9778/1987** – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica - Método de ensaio.

_____**NBR NM 26/2001**: agregados - amostragem.

_____**NBR NM 248/2003**: agregados - determinação da composição granulométrica.

_____**NBR NM 46/2003**: agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.

_____**NBR 53/2003**: agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.

_____**NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, 2004.

DNER ME 053/1994: misturas betuminosas - percentagem de betume - Método de ensaio.

_____ **ME 084/1995**: agregados miúdo determinação da densidade real - método de ensaio.

_____ **ME 117/1994**: misturas betuminosas - determinação da densidade aparente – Método de ensaio.

_____ **ME 213/1994**: solos - determinação do teor de umidade - método de ensaio.

_____ **ME 043/1995**: misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall - método de ensaio.

_____ **ME 213/1994**: solos - determinação do teor de umidade.

_____ **PRO 120/1997**: Coleta de amostras de agregados - procedimento.

_____ **PRO 199/1996:** Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório - procedimento.

DNIT 095/2006 EM: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material.

_____ **034/2005 ES**: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico reciclado a quente no local - Especificação de serviço.

_____ **136/2010 ME**: Pavimentação asfáltica - misturas asfálticas - determinação da resistência à tração por compressão diametral - método de ensaio.

_____ **005/2003 TER**: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Terminologia.

AGUILAR, G. S. **Blocos intertravados em concreto asfáltico reciclado a quente: estudo de viabilidade técnica.** 2016. 187f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Materiais - CEFET-MG. Belo Horizonte, ago. 2016.

ARAÚJO, L. M. D. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 187f. Tese de Doutorado – Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

ASPHALT INSTITUTE (AI). **AI's REOB task force**: asphalt binder ETG. Abr. 2015.

ASPHALT INSTITUTE (AI). **The use of REOB/VTAE in asphalt**: state of the knowledge. Abr. 2016.

ASTEC, Industries Inc. Adaptado de: < www.astecinc.com/products/drying-mixing/double-rap-dryer-mixer.html>. Acesso em 09 nov. 2016.

BARROS, E. S. S. **Comportamento dos betumes em função da temperatura**. 2012. 190f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. Porto, Portugal, jul. 2012.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558p.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. 3 ed. Reimp. Rio de janeiro: Abeda, 2008. 504p.

BERTOLLO, S. A. M. et al. **Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos**, In: XXVIII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITARIA, 2002, Cancun, México. **Anais...** 8 p., disponível em: <ww.resol.com.br/textos/reciclagem de pneus.pdf>. Acesso em 01 nov. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

BOCK, A. L. et al. Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. n.14, p.59-69, outubro, 2009. Disponível em: <www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art7_N14.pdf > Acesso em: 15 ago. 2017.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3 ed. rev. e atual. São Paulo: Exceção Editorial, 2007. p. 123.

BROSSEAUD Y. Reciclagem de misturas asfálticas: evolução após 20 anos e a situação atual na França. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES - ABCR, 7., out. 2011, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABCR, 2011. p. 1-17. Disponível em: <cbrcbrasvias.com.br/palestras/arquivos/TC0050-1.PDF> Acesso em: 18 set. 2016.

BUDNY, J. et al. **Avaliação de diferentes formas de incorporação de cal em misturas asfálticas.** Disponível em: <www.abms.com.br/links/bibliotecavirtual/geors2009/2009-budny-bock.pdf> Acesso em: 15 ago. 2017.

BUNCHER, M. **Asphalt Institute's Re-refined Engine Oil Bottoms (REOB) residue task force: m**ix ETG. Set. 2014.

CERATTI, J. A. P; REIS, R. M. M. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. 1. Reimp. Oficina de Textos. Rio de janeiro: Instituto Pavimentar, 2011. 151p.

CNT; SEST; SENAT. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**: relatório gerencial. 20.ed. Brasília, 2016. 399 p.

CLIFTON A. LTD. **Pothole identification, assessment and repair guidelines**. Communities of Tomorrow Leveraged Municipal Innovation Fund., 2012. 45p.

DEVAVID, B. A. et al. **Microscopia eletrônica de varredura:** aplicações e preparação de amostras. Ed. EDIPUCRS. Porto Alegre, 2007. 60p.

DI GIULIO, G. Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto. **Inovação Uniemp**, Campinas, v. 3, n. 3, jun. 2007. Disponível em: <inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S180823942007000300008&ln g=pt&nrm=iso>. Acesso em 01 nov. 2017.

FONSECA, S. A. **Estudo da viabilidade técnica da reciclagem a quente de concreto asfáltico fresado para aplicação a frio como material para confecção de remendos.** 2018. 115f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Materiais - CEFET-MG. Belo Horizonte, mar. 2018.

FREIRE, J.; GÓIS, T. S.; DOMINICINI, W. K.; LUTIF, J. O estado da arte sobre uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE – ANPET, 28., nov. 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANPET, 2014, p. 1-12. Disponível em: < www.anpet.org.br/xxviiianpet/anais/documents/AC401.pdf> Acesso em: 18 set. 2016

GEWEHR, J. **Asfalto de qualidade**. set. 2017. Disponível em: <http://asfaltodequalidade.blogspot.com/2017/09/fresagem-fina-e-microfresagem.html>. Acesso em 07 out. 2017.

GEWEHR, J. **Asfalto de qualidade**. set. 2017. Disponível em: < http://asfaltodequalidade.blogspot.com/2017/07/falha-comum-segregacao-asfaltica.html >. Acesso em 07 out. 2017.

GOOGLE. Adaptado de <www.google.com.br/imagens>. Acesso em 07 out. 2017.

HERRINGTON P. R. et. al. Waste oil distillation bottoms as bitumen extenders. **Road & Transport Research.** v. 2, nº. 4. Dec. 1993.

HUNTER, R. N. et al. **SHELL bitumen handbook**. 6. ed. ICE Publishing. Westminster, London, 2015.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente. Fortaleza**. 2003. 99 fl. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

LEÃO, L. F. C.. Do Pneu à Estrada: benefícios da utilização de borracha granulada em obras públicas**.** Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo. **Boletim Técnico.** Ed. nº 8. São Paulo, 24 jul. 2013. Disponível em: <www.sinicesp.org.br/materias/2013/bt08a.htm > Acesso em: 15 ago. 2017.

MINASFALTO. **TAP-FÁCIL.** Adaptado de: <www.minasfalto.com.br/tap-facil>. Acesso em 07 out. 2017.

MOUILLET, V. et al. Method of quantification of hydrated lime in asphalt mixtures. Publicado em **journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat. 21 jul. 2014.** Disponível em: <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814006825> Acesso em: 15 ago. 2017.

MUENCH, S. T. **HAPI Hawai'i Asphalt Paving Industry**. 2012. Disponível em: < hawaiiasphalt.org/guide/modules/05_materials/05_asphalt.htm>. Acesso em 15 out. 2016.

PADULA, F. R. G. **Contribuições à análise de especificações de componentes de rodovias e melhoria de qualidade de viagens**. 153f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2002.

PSP – **IE 07/2010**. Camadas de concreto asfáltico reciclado a quente em usina. IE - Instrução de Execução. jul. 2010. Prefeitura de São Paulo. Disponível em: <www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS%20T%C3%89CNICAS%20INSTRU%C3%87%C3%95ES%20NOVAS/ie_07_2010_camadas_de_concreto_asfaltico_reciclado_a_quente_em_usina.pdf>. Acesso em: 18 set. 2016.

SILVA, A. C. R. **Ladrilhos asfálticos reciclados:** contribuição para o estudo de viabilidade técnica. 2016. 114f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Materiais - CEFET-MG. Belo Horizonte, 2016.

SILVA, P. F. A. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. 2 ed. São Paulo. Pini. 2008. 128p.

REIS, A. C**.** C. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida**. 2013. 114f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2013.

YU, Xiaokong; et al. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders**.** Publicado em **journal homepage: www.elsevier.com/locate/fuel.** 02 jul. 2014. Disponível em: < www.sciencedirect. com/science/article/pii/S0016236114006048> Acesso em: 31 jul. 2016.

WIRTGEN GROUP. **Reciclagem a frio:** tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen. Wirtgen GmbH. Windhagen – Alemanha, 2012. p. 370. Disponível em: <media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/infomaterial_1/kaltrecycler/kaltrecycling _technologie/kaltrecycling_handbuch/Cold_recycling_Manual_PT.pdf> Acesso em: 15 ago. 2017.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements**:** state of the art. **International Journal of Pavement Engineering**. 2014. Disponível em: < sites.google.com/site/martinszaumanis/>. Acesso em: 31 jul. 2016.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B. **100% recycled hot mix asphalt:** a review and analysis. **Resources, Conservation and Recycling**. 2014. Disponível em: < www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344914001505>. Acesso em: 31 jul. 2016.

APÊNDICE A: ENTREVISTA (SUDECAP - COORDENAÇÃO DE OBRAS DA CAPITAL)

Questionário respondido pelo Sr.Maurício Cangussú Magalhães - Gerente da Divisão de Manutenção de Vias Públicas da Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP), durante entrevista realizada em 31 de agosto de 2016. Na ocasião da entrevista estavam presentes o professor Dr. Flávio Renato de Góes Padula, orientador da pesquisa e Bartira Rodrigues Neves, aluna do curso de mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).

1) Como é feita a manutenção das vias urbanas pavimentadas de Belo Horizonte?

   Resposta: “Primeiramente é feito um estudo para avaliação da situação do pavimento, essa avaliação é medida pelo ICP – Índice de Conservação do Pavimento, os critérios levam em consideração o volume de tráfego da região, o tipo de defeito no pavimento, o desconforto da pista de rolamento proporcionado pelo defeito. Um exemplo de necessidade de manutenção das vias é quando o greide da via está sobre-elevado, devido às manutenções anteriores. Neste caso, a camada de revestimento a ser fresada deve considerar a altura final de greide do projeto da pista. Antes da década de 80, não se tem registros de realização de operações de fresagem nas vias, os serviços de manutenção consistiam em aplicações de camadas de CBUQ sobre o revestimento antigo, esse processo desencadeou a elevação do greide de grande parte das vias.”
2) A prefeitura tem equipe própria para realização dos serviços de manutenção das vias?

   Resposta: “Todo serviço de manutenção de vias é terceirizado, são gerenciados 9 contratos, um para cada regional.”
3) Qual o volume aproximado de geração de CAF em Belo Horizonte e região metropolitana?

   Resposta: “O volume de CAF gerado nas regionais está vinculado ao planejamento de manutenções das vias de cada regional, por isso não têm

um valor fixo, depende da demanda de manutenção de cada regional. Quando os grandes corredores entram em manutenção são gerados volumes grandes de CAF."

4) Onde a prefeitura estoca o material fresado (CAF)?
   Resposta: "Todo material fresado é depositado nas regionais, que dispõe de pátios para o armazenamento desse material."
5) O CAF é utilizado na manutenção das vias urbanas pavimentadas de Belo Horizonte? Se sim, de que forma?
   Resposta: "Sim, cada regional usa o CAF, conforme avaliação técnica da necessidade de manutenção das vias. O CAF geralmente é usado como material de revestimento primário em vias não pavimentadas para melhorar as condições de tráfego, base de pavimentos, recomposição de valas e em operações tapa-buracos."
6) O material fresado passa por algum tipo de processamento antes de ser utilizado?
   Resposta: "Não."
7) No armazenamento dos CAF tem-se a prática de misturar materiais fresados de diferentes locais?
   Resposta: "Sim."
8) A prefeitura realiza ou já realizou reciclagem a quente de CAF?
   Resposta: "Não."
9) A prefeitura tem algum projeto que viabiliza o uso de CAF reciclado a quente na manutenção de vias urbanas pavimentadas?
   Resposta: "Sim, a prefeitura tem intenção de viabilizar o uso de CAF reciclado a quente".

APÊNDICE B: VISITA TÉCNICA (USINA DE ASFALTO - ETROS ENGENHARIA)

O processo de produção de Misturas Asfálticas Usinadas a Quente (MAUQ) da empresa Etros Engenharia Ltda foi acompanhado durante a visita realizada em fevereiro de 2017. O engenheiro responsável pelo projeto, Alexandre Reis, foi quem acompanhou a visita.

A usina de asfalto da empresa está localizada no município de São José da Lapa, região metropolitana de Belo Horizonte, próxima ao quilômetro 3 da rodovia Inácia de Carvalho, onde tem realizado obras de pavimentação.

O pátio onde ficam estocados os agregados virgens (britas, areia e pó de pedra) é todo coberto, porém o piso do pátio não é pavimentado, os agregados ficam em contato com o solo expostos a contaminação por argilominerais, isso pode comprometer a qualidade dos agregados e a eficiência das misturas.

Os agregados utilizados nas misturas são dosados a partir dos compartimentos separados por granulometria. Depois de dosados, os agregados seguem, através de uma esteira, até a entrada do tambor, para dar início ao processo de mistura dos materiais. A mistura asfáltica pronta é encaminhada ao silo superior, através de uma esteira transportadora. Esse silo tem abertura inferior, controlada mecanicamente, para carregamento dos caminhões. A pesagem dos caminhões é a última etapa, antes do transporte da mistura até o local da obra.

Observou-se que o tambor, dessa usina, é provido de entrada central para reciclagem de CAF. Ao questionar sobre uma possível dosagem com pelo menos 20% de CAF, Alexandre Reis (2017) informou que, devido a questões ambientais e exigências do projeto, a reciclagem do fresado nunca foi especificada nas dosagens das misturas. Para o engenheiro, ainda não há interesse na reciclagem de CAF, por falta de conhecimento de dosagens de misturas asfálticas com adição desse resíduo; a falta de instruções técnicas para realização dos processos de fabricação de misturas recicladas a quente; além da ausência de aplicações de revestimentos

reciclados com CAF, que comprovem o bom desempenho e durabilidade em relação às misturas especificadas e ou com dosagens padronizadas.

Apesar de comentar sobre as vantagens econômicas e ambientais decorrentes da incorporação de CAF nas dosagens de MARQ, parece não haver, ainda, interesse por parte da empresa em utilizar o resíduo em suas misturas. Segundo Alexandre (2017), a falta de informações sobre MARQ aplicadas em obras de pavimentação asfáltica no Brasil, que comprovem o bom desempenho e durabilidade em relação às misturas especificadas e ou com dosagens padronizadas, também contribui para manter a resistência dos responsáveis pelos projetos de MAUQ em não reciclar o CAF.

Ao ser questionado sobre a dosagem da mistura asfáltica que estava sendo produzida no dia da visita; Alexandre Reis (2017) informou que não havia uma especificação para aquela mistura, pois toda a produção daquele dia seria aplicada em operações de “tapa-buracos”, devido ao período de chuvas do local.

APÊNDICE C: VISITA TÉCNICA À REGIONAL OESTE (SUDECAP)

A coleta do resíduo (CAF) foi realizada durante visita à Regional Oeste, realizada em agosto de 2017. A recepção ao local foi feita pelo Sr. Tomás Arantes, engenheiro responsável pela administração dessa regional, quem disponibilizou o resíduo para a pesquisa experimental.

A visita ao local durou cerca de uma hora e meia. No pátio de estocagem do CAF foi realizada uma inspeção visual do resíduo e observadas as condições de armazenamento do material. Segundo Arantes (2017), o resíduo estocado nesta regional é proveniente da fresagem das vias urbanas da capital e da região metropolitana de Belo Horizonte. Ao ser questionado sobre a origem específica do resíduo, Arantes (2017) informou que não há registros de data e locais específicos das obras de manutenção, que geraram o resíduo em estoque. O CAF é estocado em pilhas a céu aberto. De acordo com Arantes (2017), não há locais cobertos disponíveis, em nenhuma das regionais, para armazenamento desse resíduo.